



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ
ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Φοιτητής: Αρχάβλη Γιάννα
ΑΜ: cw6965

Επιβλέπων Καθηγητής

Πλούταρχος Κέρπελης
Λέκτορας ΠΑΔΑ

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ,
ΜΑΙΟΣ 2024



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

Diploma Thesis

**VULNERABILITY CURVES
DUE TO STRUCTURES' SEISMIC RISK**

**Student: Archavli Gianna
Registration Number: cw6965**

Supervisor

**Ploutarchos Kerpelis
Lecturer UNIWA**

**ATHENS-EGALEO,
May 2024**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Κέρπελης Πλ., Λέκτορας ΠΑΔΑ), (Επιβλέπων)	Αλεξάκης Δημήτριος, Καθηγητής ΠΑΔΑ (Εξεταστής)	Ρεπαπής Κωνσταντίνος, Αναπλ. Καθηγητής ΠΑΔΑ (Εξεταστής)
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

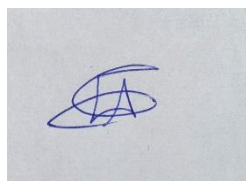
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Αρχάβλη Γιάννα του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου cw6965 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Η Δηλούσα
Αρχάβλη Γιάννα



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο “Καμπύλες Τρωτότητας λόγω Σεισμικής Διακινδύνευσης των κατασκευών”, ολοκληρώνεται η φοίτηση μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Για την διεκπεραίωση της εργασίας αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Πλούταρχο Κέρπελη, Λέκτορα του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΠΑΔΑ. Ως επιβλέπων καθηγητής μου, με καθοδήγησε και με βοήθησε στην υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας, με μία άριστη συνεργασία.

Επίσης, τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Ρεπαπή Κωνσταντίνο και Αλεξάκη Δημήτριο .

Τέλος, την οικογένεια μου που είναι πάντα κοντά μου και με στηρίζει στις προσπάθειες μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	9
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	15
ABSTRACT	16
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1. ΜΕΡΟΣ Α:	18
1.1 Ορισμοί	18
1.1.1 Σεισμική Διακινδύνευση.....	18
1.1.2 Σεισμική Επικινδυνότητα	19
1.1.3 Σεισμική Τρωτότητα.....	21
1.1.4 Δείκτες Έντασης Σεισμού.....	23
1.1.5 Μέθοδοι Εκτίμησης Καμπυλών Τρωτότητας.....	23
1.1.6 Εμπειρική Μέθοδος	23
1.1.7 Αναλυτική Μέθοδος	24
1.1.8 Υβριδική Μέθοδος.....	24
1.1.9 Υπολογισμός Καμπυλών Τρωτότητας.....	24
2. ΜΕΡΟΣ Β:	28
2.1 Καμπύλες Τρωτότητας Κτιριακών Έργων	28
2.1.1 Καμπύλες Τρωτότητας Κτιρίων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα	28
2.1.2 Καμπύλες Τρωτότητας Κτιρίων κατά ΒΔ '59 και ΕΑΚ2000	29
2.1.3 Καμπύλες Τρωτότητας Πολυώροφου Κτιρίου από Ω.Σ.....	32
2.1.4 Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικών Κατασκευών	37
2.1.5 Καμπύλες Τρωτότητας Κτιρίων από Φέρουσα Τοιχοποιία.....	47
2.2 Καμπύλες Τρωτότητας Συγκοινωνιακών Δικτύων	52
2.2.1 Καμπύλες Τρωτότητας σε Γέφυρες	52
2.2.2 Καμπύλες τρωτότητας σε σήραγγες	57
2.3 Οδοί	62
2.3.1 Καμπύλες Τρωτότητας Επιχωμάτων Οδοποιίας	62
2.3.2 Καμπύλες τρωτότητας σε Τοίχους Αντιστήριξης.....	65
2.4 Λιμενικά Έργα	72
2.4.1 Καμπύλες Τρωτότητας Κρηπιδότοιχων Βαρύτητας.....	72
2.5 Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας (Δ.Κ.Ω.)	78
2.5.1 Καμπύλες Τρωτότητας Δικτύου Ύδρευσης και Αποχέτευσης.....	79
2.5.2 Καμπύλες Τρωτότητας Αγωγών	84
2.5.3 Καμπύλες Τρωτότητας Χαλύβδινου Αγωγού.....	89
ΜΕΡΟΣ Γ:	92
3. Συμπεράσματα	92
Βιβλιογραφία –Αναφορές -Διαδικτυακές Πηγές	95
4. Βιβλιογραφία	95

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Συνήθεις τύποι κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος στην Ελλάδα	29
Πίνακας 2.2:Στάθμες βλάβης και απωλειών για κτίρια Οπλισμένου Σκυροδέματος (R/C) (Karpos, et al., 2006)	29
Πίνακας 2.3: Πίνακας σταθμών επιτελεστικότητας κατά τη διαμήκη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).	33
Πίνακας 2.4:Συντελεστής Κλιμάκωσης Ελαστικού Φάσματος κατά τη διαμήκη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).	33
Πίνακας 2.5: Όρια σταθμών επιτελεστικότητας κατά τη διεύθυνση Z (Κακαλέτρης, 2024).	35
Πίνακας 2.6: Συντελεστής κλιμάκωσης ελαστικού φάσματος κατά τη διεύθυνση Z (Κακαλέτρης, 2024).	35
Πίνακας 2.7: Μεταλλικές διατομές δοκών και υποστυλωμάτων πλαισίου (Τσουμάνη, 2023).	39
Πίνακας 2.8: Ποσοστό βλάβης κτιρίου για κονιάματα συναρτήσσει εδαφικών επιταχύνσεων (Πολυχρονίου, 2011).	48
Πίνακας 2.9: Επίπεδα βλάβης για την εξαγωγή καμπυλών τρωτότητας (Πολυχρονίου, 2011).	48
Πίνακας 2.10: Καθορισμός σταθμών βλάβης για γέφυρες με ανελαστικά βάθρα (Μπάρλα , 2004) ..	52
Πίνακας 2.11: Καθορισμός σταθμών βλάβης για γέφυρες με εφέδρανα (Μπάρλα , 2004)	53
Πίνακας 2.12: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση κατά τη σύγκριση μεθόδων διάνοιξης σηράγγων (Φωτοπούλου, 2007).	60
Πίνακας 2.13: Μόνιμη εδαφική μετακίνηση κατά τη σύγκριση μεθόδων διάνοιξης σηράγγων (Φωτοπούλου, 2007).	60
Πίνακας 2.14: Γεωμετρικές Παράμετροι Προσομοιώματος (Πεταλά, κ.α., 2023).	63
Πίνακας 2.15: Χαρακτηριστικά προσομοιώματος των τριών τοίχων αντιστήριξης (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	65
Πίνακας 2.16: Χαρακτηριστικά σεισμικών καταγραφών που αξιοποιήθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	66
Πίνακας 2.17: Επίπεδα βλάβης τοίχων αντιστήριξης (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	67
Πίνακας 2.18: Παράμετροι Καμπυλών Τρωτότητα για την περίπτωση του δείκτη βλάβης κατακόρυφης μετατόπισης U_y (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	67
Πίνακας 2.19: Παράμετροι Καμπυλών Τρωτότητας για την περίπτωση του δείκτη βλάβης της οριζόντιας μετατόπισης U_x (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	69

Πίνακας 2.20: Στάθμες βλάβης Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).....	72
Πίνακας 2.21: Παράμετροι καμπυλών τρωτότητας Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).....	73
Πίνακας 2.22: Περιγραφή επιπέδων βλάβης Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).	73
Πίνακας 2.23: Διαστάσεις των υπό μελέτη Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).	75
Πίνακας 2.24: Επίπεδα βλάβης κρηπιδότοιχου (Δημητρίου, 2008).	75
Πίνακας 2.25: Πίνακας Αλγόριθμων Ζημιών σε Μικρές ΕΕΛ (Σοκόλη , 2023).	80
Πίνακας 2.26: Πίνακας Αλγόριθμων Ζημιών για Μεσαίες ΕΕΛ (Σοκόλη , 2023).	81
Πίνακας 2.27: Πίνακας Αλγόριθμων Ζημιών για μεγάλες ΕΕΛ (Σοκόλη , 2023).	82
Πίνακας 2.28: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση αγωγών (Τερζή, κ.α., 2008).	84

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Τρίγωνο συνιστωσών διακινδύνευσης	18
Σχήμα 1.2: Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας στην Ελλάδα	19
Σχήμα 1.3: Καμπύλη σεισμικού κινδύνου	20
Σχήμα 1.4: Καμπύλες Τρωτότητας με τέσσερεις στάθμες βλάβης.....	21
Σχήμα 1.5: Σχέση Σεισμικής Διέγερσης – Βλάβης.....	22
Σχήμα 1.6: Παράδειγμα καμπύλης τρωτότητας.....	25
Σχήμα 1.7: Πιθανότητα υπέρβασης των τεσσάρων σταθμών βλάβης.....	25
Σχήμα 1.8: : Διάγραμμα ροής για την περιγραφή των συνιστωσών υπολογισμού καμπυλών τρωτότητας και της πιθανότητας βλάβης.....	27
Σχήμα 2.1: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με κανονικές τοιχοπληρώσεις, βάση του ΒΔ '59 (Karros, et al., 2006).	30
Σχήμα 2.2: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με κανονικές τοιχοπληρώσεις, βάση ΕΑΚ2000 (Karros, et al., 2006).	30
Σχήμα 2.3: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με πιλοτή, βάση ΒΔ '59 (Karros, et al., 2006).	30
Σχήμα 2.4: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με πιλοτή, βάση ΕΑΚ2000 (Karros, et al., 2006).....	31
Σχήμα 2.5: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με μικτό σύστημα βάση ΒΔ '59 (Karros, et al., 2006).....	31
Σχήμα 2.6: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με μικτό σύστημα, βάση ΕΑΚ2000 (Karros, et al., 2006).	31
Σχήμα 2.7: Ελαστικό Φάσμα Σχεδιασμού - EC8 (Κακαλέτρης, 2024).	32
Σχήμα 2.8: Καμπύλη Ικανότητας στη διαμήκη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).	33
Σχήμα 2.9: Κλιμάκωση Ελαστικού Φάσματος κατά τη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).	34
Σχήμα 2.10: Καμπύλη Τρωτότητας με βάση το Φάσμα του Ευρωκώδικα και τη Μέθοδο των Συντελεστών κατά τη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).....	34
Σχήμα 2.11: Καμπύλη Ικανότητας κατά την εγκάρσια διεύθυνση Z	35
Σχήμα 2.12: Ελαστικό φάσμα κατά την εγκάρσια διεύθυνση Z (Κακαλέτρης, 2024).....	36

Σχήμα 2.13: Καμπύλη Τρωτότητας κατά τη διαμήκη διεύθυνση Z (Κακαλέτρης, 2024).....	36
Σχήμα 2.14: Πλαίσια παραλαβής ροπής (ζώνες απόδοσης ενέργειας σε δοκούς και στην βάση των υποστλωμάτων).....	37
Σχήμα 2.15: Πλαίσια με διαγώνιους συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα (ζώνες απόδοσης ενέργειας σε εφελκόμενες διαγώνιους).....	37
Σχήμα 2.16: Πλαίσια με V μορφής συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα (ζώνες απόδοσης ενέργειας οι εφελκόμενες και θλιβόμενες ζώνες)	37
Σχήμα 2.17: Πλαίσια με έκκεντρος συνδέσμους (ζώνες απόδοσης ενέργειας σε καμπτικούς συνδέσμους ή συνδέσμους τέμνουσας)	38
Σχήμα 2.18: Σύστημα ανεστραμμένου εκκρεμούς α) ζώνες απόδοσης ενέργεια στη βάση υποστλωμάτων, b) ζώνες απόδοσης σε υποστυλώματα	38
Σχήμα 2.19: Προσομοίωση μεταλλικού πλαισίου ροπών, MRF	39
Σχήμα 2.20: Προσομοίωση μεταλλικού πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα, CBF	39
Σχήμα 2.21: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, με ταχύτητες διατμητικών κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).	40
Σχήμα 2.22: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, με ταχύτητες διατμητικών κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).	40
Σχήμα 2.23: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=150\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).....	41
Σχήμα 2.24: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=360\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).....	41
Σχήμα 2.25: Καμπύλες τρωτότητας μεταλλικού πλαισίου MRF σε όρους απωλειών, με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=150\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).....	42
Σχήμα 2.26: Καμπύλες τρωτότητας μεταλλικού πλαισίου MRF σε όρους απωλειών, με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=360\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).....	43
Σχήμα 2.27: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε πακτωμένη θεμελίωση, με ταχύτητες κυμάτων δυσκαμψίας $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).....	44
Σχήμα 2.28: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε ενδόσιμη θεμελίωση, με ταχύτητες κυμάτων δυσκαμψίας $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).	44
Σχήμα 2.29: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF, για αργλικό εδαφικό προφίλ με ταχύτητα κύματος δυσκαμψίας $V_s=150\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).	45

Σχήμα 2.30:Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF , με ταχύτητα κύματος δυσκαμψίας $V_s=360\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).	45
Σχήμα 2.31: Καμπύλες τρωτότητας μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε όρους απωλειών, με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=150\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).	46
Σχήμα 2.32: : Καμπύλες τρωτότητας μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε όρους απωλειών, με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=360\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).	46
Σχήμα 2.33: Προσομοίωμα κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία	47
Σχήμα 2.34: Καμπύλες τρωτότητας κανονικής κατανομής για βλάβες τύπου α (Πολυχρονίου, 2011).	49
Σχήμα 2.35: Καμπύλες τρωτότητας κανονικής κατανομής για βλάβες τύπου β (Πολυχρονίου, 2011).	49
Σχήμα 2.36: Καμπύλες τρωτότητας κανονικής κατανομής για βλάβες τύπου γ (Πολυχρονίου, 2011).	49
Σχήμα 2.37: Καμπύλες τρωτότητας λογαριθμικής κατανομής για βλάβες τύπου α (Πολυχρονίου, 2011).	50
Σχήμα 2.38: Καμπύλες τρωτότητας λογαριθμικής κατανομής για βλάβες τύπου β (Πολυχρονίου, 2011).	50
Σχήμα 2.39: Καμπύλες τρωτότητας λογαριθμικής κατανομής για βλάβες τύπου γ (Πολυχρονίου, 2011).	51
Σχήμα 2.40:Διάγραμμα εξέλιξης της σεισμικής βλάβης	53
Σχήμα 2.41: Καμπύλες αντίστασης ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (Κάππος, κ.α., 2006)	54
Σχήμα 2.42: Καμπύλες Τρωτότητας για την γέφυρα της Κρυσταλλοπηγής (Κάππος, κ.α., 2006).	54
Σχήμα 2.43: Διάγραμμα ροπών - στροφών ($M-\theta$) των σεισμικών συνδέσμων	55
Σχήμα 2.44: Καμπύλες αντίστασης γέφυρας ποταμού Λίσσου κατά την διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση (Κάππος, κ.α., 2006).	56
Σχήμα 2.45: Καμπύλες Τρωτότητας της γέφυρας του ποταμού Λίσσου (Κάππος, κ.α., 2006).	56
Σχήμα 2.46: Αναλυτικές και εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για σήραγγα κυκλικής διατομής για μικρές βλάβες (Αργυρουδης, κ.α., 2008).	58
Σχήμα 2.47:Αναλυτικές και εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για σήραγγα κυκλικής διατομής για μέτριες βλάβες (Αργυρουδης, κ.α., 2008)..	58
Σχήμα 2.48:Αναλυτικές και εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για σήραγγα ορθογωνικής διατομής για μικρές βλάβες (Αργυρουδης, κ.α., 2008).	59

Σχήμα 2.49: Αναλυτικές και εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για σήραγγα ορθογωνικής διατομής για μέτριες βλάβες (Αργυρουδης, κ.α., 2008)..	59
Σχήμα 2.50: Καμπύλες Τρωτότητας (Fragility Curves) Σηράγγων Ολομέτωπης Διάνοιξης, συναρτήσεως της εδαφικής επιτάχυνσης (Φωτοπούλου, 2007).	61
Σχήμα 2.51: Καμπύλες Τρωτότητας (Fragility Curves) Σηράγγων με μέθοδο «cut and cover», συναρτήσεως της εδαφικής επιτάχυνσης (Φωτοπούλου, 2007).	61
Σχήμα 2.52: Καμπύλες Τρωτότητας (Fragility Curves) Σηράγγων Ολομέτωπης Διάνοιξης και «cut & cover» συναρτήσεως της εδαφικής μετακίνησης (Φωτοπούλου, 2007).	62
Σχήμα 2.53: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος επιχώματος	63
Σχήμα 2.54: Καμπύλη Τρωτότητας Επιχωμάτων Οδοποιίας λόγω διάδοσης διάρρηξης κανονικού ρήγματος (Πεταλά, κ.α., 2023).	63
Σχήμα 2.55: Καμπύλη Τρωτότητας Επιχωμάτων Οδοποιίας λόγω διάδοσης διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος (Πεταλά, κ.α., 2023).	64
Σχήμα 2.56: Καμπύλες Τρωτότητας Επιχωμάτων Οδοποιίας λόγω διάδοσης διάρρηξης ρήγματος ολίσθησης (άγνωστο ρήγμα) (Πεταλά, κ.α., 2023).	64
Σχήμα 2.57: Προσομοίωμα τοίχου αντιστήριξης	65
Σχήμα 2.58: Δισδιάστατο προσομοίωμα εδάφους - τοίχου αντιστήριξης με ύψος $H=6$ μέτρα	66
Σχήμα 2.59: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την κατακόρυφη μετατόπιση του υλικού επίχωσης για παράμετρο έντασης την κορυφαία εδαφική επιτάχυνση PGA (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	68
Σχήμα 2.60: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την κατακόρυφη μετατόπιση του υλικού επίχωσης για παράμετρο έντασης την κορυφαία εδαφική ταχύτητα PGV (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	68
Σχήμα 2.61: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την κατακόρυφη μετατόπιση του υλικού επίχωσης για παράμετρο έντασης αθροιστική απόλυτη ταχύτητα CAV (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	69
Σχήμα 2.62: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την οριζόντια μετατόπιση της βάσης του τοίχου με παράμετρο έντασης την κορυφαία εδαφική επιτάχυνση PGA (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	70
Σχήμα 2.63: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την οριζόντια μετατόπιση της βάσης του τοίχου με παράμετρο έντασης την κορυφαία εδαφική ταχύτητα PGV (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	70

Σχήμα 2.64: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την οριζόντια μετατόπιση της βάσης του τοίχου με παράμετρο έντασης την αθροιστική απόλυτη ταχύτητα CAV (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).	71
Σχήμα 2.65: Καμπύλη τρωτότητας κρηπιδότοιχου βαρύτητας (Δημητρίου, 2008).	72
Σχήμα 2.66: Καμπύλες Τρωτότητας Κρηπιδότοιχου βαρύτητας (Δημητρίου, 2008).	74
Σχήμα 2.67: Προσομοίωση εξεταζόμενοι κρηπιδότοιχου	74
Σχήμα 2.68: Σχέση δείκτη βλάβης U/H με την επιτάχυνση στη βάση και μέσες τιμές PGA για μικρές και μέτριες βλάβες	76
Σχήμα 2.69: Καμπύλες Τρωτότητας για μικρές και μέτριες βλάβες Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).	76
Σχήμα 2.70: Σύγκριση Καμπυλών Τρωτότητας για μικρές βλάβες (Δημητρίου, 2008).	77
Σχήμα 2.71: Σύγκριση Καμπυλών Τρωτότητας για μέτριες βλάβες (Δημητρίου, 2008).	77
Σχήμα 2.72: Πρότυπα Προσομοιώματα Κυκλικών Δεξαμενών Καθίζησης	79
Σχήμα 2.73: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μικρές ΕΕΛ, με αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).	80
Σχήμα 2.74: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μικρές ΕΕΛ, με μη αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).	81
Σχήμα 2.75:Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μεσαίες ΕΕΛ με αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).	82
Σχήμα 2.76: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μεσαίες ΕΕΛ, με μη αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).	82
Σχήμα 2.77: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μεγάλες ΕΕΛ με αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).	83
Σχήμα 2.78: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μεγάλες ΕΕΛ με μη αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).	83
Σχήμα 2.79: Καμπύλες τρωτότητας αγωγών PVC, για διάφορες διαμέτρους (Τερζή, κ.α., 2008).	85
Σχήμα 2.80: Καμπύλες Τρωτότητας αγωγών HDPE, για διάφορες διαμέτρους (Τερζή, κ.α., 2008)..	86
Σχήμα 2.81:Μέσες καμπύλες τρωτότητας αγωγών PVC (Τερζή, κ.α., 2008).	87
Σχήμα 2.82:Μέσες καμπύλες τρωτότητας αγωγών HDPE (Τερζή, κ.α., 2008).	87
Σχήμα 2.83: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών τρωτότητας εύκαμπτων αγωγών (Τερζή, κ.α., 2008).	88

Σχήμα 2.84: Δεδομένα Προγράμματος.....	89
Σχήμα 2.85: Καμπύλες Τρωτότητας (υλικού αγωγού X-52) (Ρούμπα, 2009).....	89
Σχήμα 2.86: Καμπύλες Τρωτότητας (υλικού αγωγού X-42) (Ρούμπα, 2009).....	90
Σχήμα 2.87: Καμπύλες Τρωτότητας Αγωγού X-52 (λόγω επίδρασης διαμέτρου αγωγού) (Ρούμπα, 2009).	90
Σχήμα 2.88: Καμπύλες τρωτότητας Αγωγών (λόγω αλλαγής εδάφους) (Ρούμπα, 2009).	91

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το αντικείμενο της σεισμικής τρωτότητας η οποία αποτελεί βασικό παράγοντα στη διαχείριση του σεισμικού κινδύνου.

Ορίζονται οι έννοιες της σεισμικής διακινδύνευσης, επικινδυνότητας και σεισμικής τρωτότητας σε κτιριακά έργα και σε έργα υποδομής. Αναλύονται μέθοδοι υπολογισμού και μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για την αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας. Η σεισμική τρωτότητα αποτελεί εργαλείο προσδιορισμού των αναμενόμενων βλαβών μετά από μια σεισμική έξαρση. Ο υπολογισμός της αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών προϋποθέτει την αποτίμηση της τρωτότητας των επιμέρους συνιστωσών αυτής και την διερεύνηση των παραγόντων που την διαμορφώνουν. Οι συνέπειες των τρωτοτήτων είναι οι επερχόμενες βλάβες των κατασκευών, σε συνάρτηση με τη σεισμική επικινδυνότητα μιας περιοχής (πχ τις εδαφικές συνθήκες) και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Η απόκριση και η λειτουργικότητα των κατασκευών για ένα επίπεδο σεισμικής διέγερσης εξαρτάται από την τρωτότητα των στοιχείων που τα συνθέτουν.

Εξετάζεται η σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών από προγενέστερους σεισμούς μέσω της σεισμικής τρωτότητας, με στόχο τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας για διάφορα επίπεδα βλάβης σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει.

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει διαθέσιμες καμπύλες τρωτότητας οι οποίες έχουν προκύψει μετά από έρευνα κυρίως στον ελλαδικό χώρο αλλά και στο εξωτερικό. Κατηγοριοποιούνται σε ομάδες της κάθε κατασκευής, οι οποίες συμβάλουν στην τρωτότητα των υποδομών ενός αστικού περιβάλλοντος. Επίσης, παρουσιάζονται καμπύλες τρωτότητας από ερευνητικά προγράμματα και μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται διεθνώς.

Η παρούσα διπλωματική συμβάλλει στην ανάπτυξη κατάλληλου υποβάθρου καθώς και των κατάλληλων εργαλείων για την αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας, ώστε να δώσει άμεσα αποτελέσματα και μία γενική εικόνα των αναμενόμενων βλαβών υπό σεισμικές διεγέρσεις μίας κατασκευής.

Στην τελευταία ενότητα γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα της εργασίας.

ABSTRACT

This bachelor thesis examines the subject of seismic vulnerability as a key factor in managing a seismic hazard.

The concepts of seismic risk, hazard, and seismic vulnerability in building projects and infrastructure works are defined. Calculation methods and methodologies analyzed to evaluate seismic vulnerability. Seismic vulnerability is a tool for determining the expected impacts and the reduction of seismic risk after an earthquake strike. The calculation of evaluation of seismic vulnerability of constructions presupposed the evaluation of the vulnerability of their individual components and the exploration of the factors that shape it. The consequences of vulnerabilities are the upcoming damage to constructions, in relation to the seismic hazard of an area (e.g., soil conditions) and constructions characteristics. The response and functionality of constructions for a level of seismic stimulation depends on the vulnerability of the elements that make up them.

Seismic behavior of the constructions from earlier earthquakes through seismic vulnerability is examined, with the aim of calculating the chance of failure for various levels of damage according to existing research.

The present study presents available vulnerability curves that have emerged after research mainly in Greece but also in abroad. These are categorized into groups of each construction, which contribute to the vulnerability of the infrastructure of an urban environment. Vulnerability curves are presented also by research programs and methodologies used internationally.

This thesis contributes to the development of an appropriate background as well as the appropriate tools to evaluate the vulnerability of seismic vulnerability, to provide immediate results and an overall picture of the expected impacts, under seismic stimulations of a construction.

The last section is a reference to the conclusion of the work.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εύρυθμη λειτουργία μίας κοινωνίας αποτελεί παγκόσμιο ζήτημα και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις εμφάνισης ενός φυσικού φαινομένου όπως είναι ο σεισμός, όπου οι επιπτώσεις του μπορεί να αποβούν καταστροφικές.

Στόχος είναι η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής με την εκτίμηση του βαθμού βλάβης κατά την εμφάνιση ενός σεισμικού γεγονότος. Αυτό επιτυγχάνεται με την σεισμική διακινδύνευση (seismic risk) που ορίζει τις αναμενόμενες συνέπειες έπειτα από ένα σεισμικό γεγονός και υπολογίζεται με τον καθορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας και της τρωτότητας του κάθε στοιχείου που εκτίθεται στον σεισμικό κίνδυνο.

Η σεισμική επικινδυνότητα αφορά μία παράμετρο της εδαφικής ταλάντωσης να ξεπεράσει ένα δεδομένο όριο μία χρονική στιγμή, ενώ η τρωτότητα καθορίζει τον βαθμό απωλειών του έργου. Η σεισμική τρωτότητα εκφράζεται μέσω των καμπυλών τρωτότητας, οι οποίες παρουσιάζουν την πιθανότητα υπέρβασης ενός επιπέδου βλάβης (ελαφρές / μεσαίες / σημαντικές βλάβες / κατάρρευση). Η αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας πραγματοποιείται για τον υπολογισμό των αναμενόμενων αυτών απωλειών από μελλοντικούς σεισμούς διαφορετικών εντάσεων.

Αναλυτικότερα γίνεται παρακάτω προεπισκόπηση της πορείας των κεφαλαίων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο 1^ο Κεφάλαιο αναφέρονται και επεξηγούνται οι βασικοί ορισμοί της σεισμικής επικινδυνότητας, της σεισμικής διακινδύνευσης, και της σεισμικής τρωτότητας που παρουσιάζονται και διερευνώνται στην παρούσα εργασία. Αναφέρονται μέθοδοι εκτίμησης και υπολογισμού των καμπυλών τρωτότητας των κατασκευών.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρατίθενται καμπύλες τρωτότητας κτιριακών έργων. Αναλύονται οι τρόποι κατασκευής των καμπυλών τρωτότητας αυτών και γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων από μελέτες που υλοποιήθηκαν.

Στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύονται καμπύλες τρωτότητας σε συγκοινωνιακά δίκτυα, τα οποία αφορούν έργα υποδομής και μεταφοράς. Δίνονται εμπειρικές καμπύλες ερευνητικών προγραμμάτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται το δίκτυο ύδρευσης και αποχέτευσης στην Ελλάδα και παρουσιάζονται καμπύλες τρωτότητας των επιμέρους κατασκευών που το περιλαμβάνουν, όπως για παράδειγμα οι αγωγοί ύδρευσης και αποχέτευσης.

Τέλος στο 5^ο Κεφάλαιο συνοψίζονται όλα όσα παρουσιάστηκαν στην διπλωματική εργασία. Σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις καμπύλες τρωτότητας στα παραπάνω κεφάλαια με σκοπό την ανάδειξη της σπουδαιότητάς τους. Οι καμπύλες τρωτότητας αποτελούν ένα σημαντικό «εργαλείο» για την διαχείριση του σεισμικού κινδύνου, που αποτελεί έναν τομέα της πολιτικής προστασίας, στον οποίο δίνεται μεγάλη βαρύτητα διεθνώς τα τελευταία χρόνια.

1. ΜΕΡΟΣ Α:

1.1 Ορισμοί

1.1.1 Σεισμική Διακινδύνευση

Η σεισμική διακινδύνευση (Seismic Risk) εκφράζει τις πιθανές συνέπειες ενός σεισμού. Αναφέρεται στις αναμενόμενες απώλειες ενός στοιχείου που εκτίθεται σε κίνδυνο μια χρονική περίοδο. Το στοιχείο μπορεί να είναι ένα κτίριο ή ένα σύνολο κτιρίων, ένα μέρος ή ολόκληρο το δίκτυο, καθώς και ο πληθυσμός μιας περιοχής ή οι οικονομικές δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή. Αφορά τις οικονομικές, κοινωνικές ή περιβαλλοντικές απώρροιες λόγω του σεισμού και εξαρτάται από τη σεισμική επικινδυνότητα (seismic hazard), τα υπό διακινδύνευση στοιχεία (exposure) και την τρωτότητά τους (vulnerability) (Σχήμα 1.1) (Αργυρούδη, 2010).



Σχήμα 1.1: Τρίγωνο συνιστωσών διακινδύνευσης

Για τον υπολογισμό της σεισμικής διακινδύνευσης χρειάζεται να εκτιμηθεί η σεισμική επικινδυνότητα και η τρωτότητα (vulnerability).

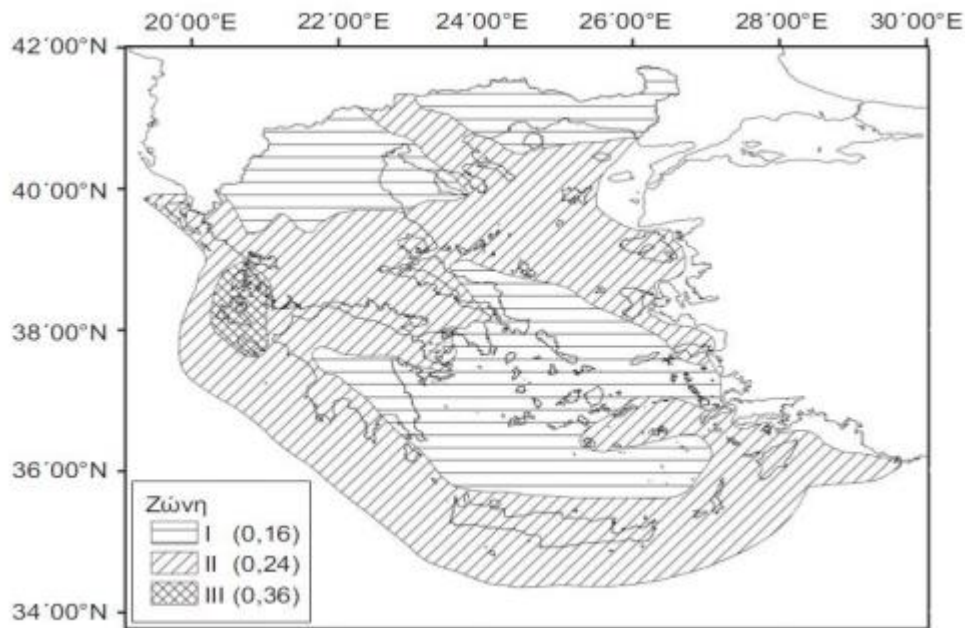
Σεισμική διακινδύνευση = Σεισμικός κίνδυνος * Σεισμική Τρωτότητα

Η αποτίμηση της διακινδύνευσης προσδιορίζει τις απώλειες και στην επίδραση που έχουν στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Τα αποτελέσματα προβλέπουν τις μελλοντικές επιπτώσεις σε μία περιοχή και συμβάλλουν στην προσπάθεια σύνταξης χαρτών περιοχών υψηλής διακινδύνευσης (risk maps) ώστε να αυξηθεί η ανθεκτικότητά της (Σταματάκης, 2012).

Οι μελέτες σεισμικής διακινδύνευσης είναι δύσκολες λόγω των πολλών παραμέτρων, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη, αλλά και της ανακρίβειας των χαρακτηριστικών τους.

1.1.2 Σεισμική Επικινδυνότητα

Με την σεισμική επικινδυνότητα ή σεισμικό κίνδυνο (Seismic Hazard) περιγράφονται οι βλάβες που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα περιβάλλον (φυσικό και ανθρωπογενές). Ορίζεται η τιμή της εδαφικής κίνησης για την οποία υπάρχει πιθανότητα υπέρβασης σε ορισμένη χρονική περίοδο (Παππάς, 2020). Εξαρτάται από τη σεισμικότητα της περιοχής, την επίδραση του μέσου διάδοσης της σεισμικής διέγερσης και την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται οι ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα (N1154B/2023).



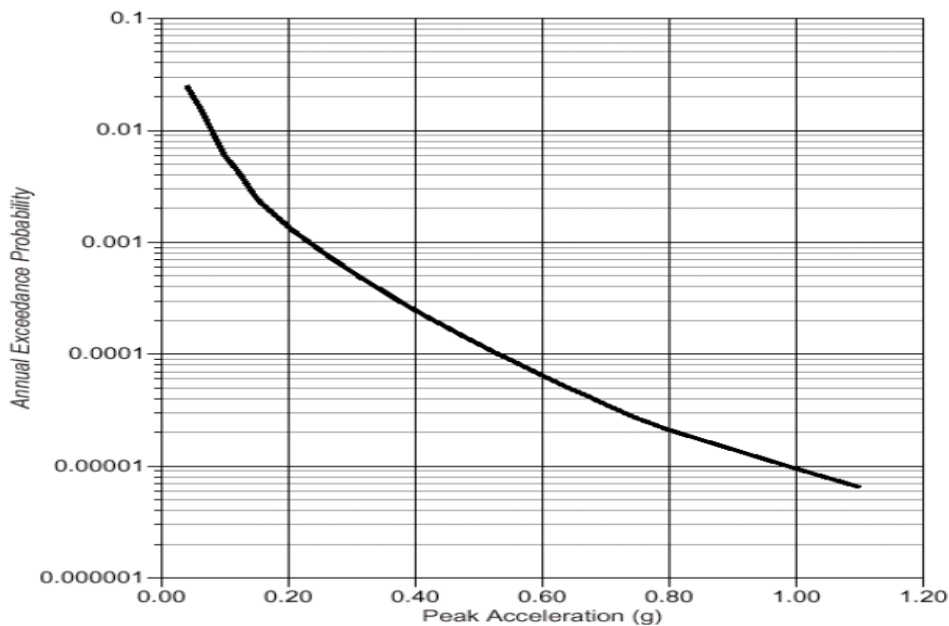
Σχήμα 1.2: Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας στην Ελλάδα

Σύμφωνα με άλλους ερευνητές, ο σεισμικός κίνδυνος περιγράφει τις αναμενόμενες βλάβες που πρόκειται να υποστεί μία κατασκευή και την πιθανότητα να συμβεί ένα σεισμικό γεγονός ίσο ή μεγαλύτερο από το προβλεπόμενο εντός μίας χρονικής περιόδου. Ως κίνδυνος περιγράφεται η κατάσταση όπου οποιοδήποτε φυσικό γεγονός, φαινόμενο ή ανθρώπινη ενέργεια μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον (Ρούμπα, 2009).

Για την αξιολόγηση της σεισμικής συμπεριφοράς των υφιστάμενων εγκαταστάσεων χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι. Πρώτον τα σεισμικά σενάρια, τα οποία περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να αναπτυχθεί ένας κίνδυνος στο μέλλον. Η επιλογή των σεισμικών σεναρίων περιλαμβάνει μεγάλους σεισμούς καθώς και μικρότερου μεγέθους αλλά με μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσής τους. Θεωρείται δε ότι αποτελούν ενδεδειγμένο τρόπο αξιολόγησης των σεισμικών κινδύνων και είναι χρήσιμα για την εκτίμηση των πιθανών βλαβών που προκαλεί ένας σεισμός. Με την συνεχή καταγραφή της εμφάνισης ενός σεισμικού γεγονότος επιλέγεται το κατάλληλο σεισμικό σενάριο και η αποτίμηση των αναμενόμενων βλαβών.

Δεύτερον η πιθανολογική εμφάνιση σεισμών, όπου ο εδαφικός κίνδυνος ορίζεται ως η υπέρβαση μιας ορισμένης μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους, σε μία συγκεκριμένη θέση σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα εκφράζεται μέσω μίας καμπύλης σεισμικού κινδύνου όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.

Η πιθανολογική εμφάνιση σεισμών είναι χρήσιμη για την εκτίμηση των βλαβών που αναμένονται να εμφανιστούν σε ετήσια βάση (Σταματάκης, 2012).



Σχήμα 1.3: Καμπύλη σεισμικού κινδύνου

Οι όροι υψηλή διακινδύνευση και υψηλή επικινδυνότητα διαφέρουν. Περιοχές που ανήκουν σε ζώνες υψηλής επικινδυνότητας δεν ανήκουν απαραίτητα σε περιοχές με υψηλή διακινδύνευση. Η σεισμική διακινδύνευση αντικατοπτρίζει τις αναμενόμενες σεισμικές απώλειες, ενώ η σεισμική επικινδυνότητα περιγράφει την ένταση ενός ενδεχόμενου σεισμικού φαινομένου ως προς μία παράμετρο εδαφικής απόκρισης (Σταματάκης, 2012).

Επομένως, τόσο η επικινδυνότητα όσο και η διακινδύνευση σχετίζονται με την πιθανότητα να συμβεί ένα επικίνδυνο γεγονός με συχνότητα επανάληψης (Αργυρούδη, 2010).

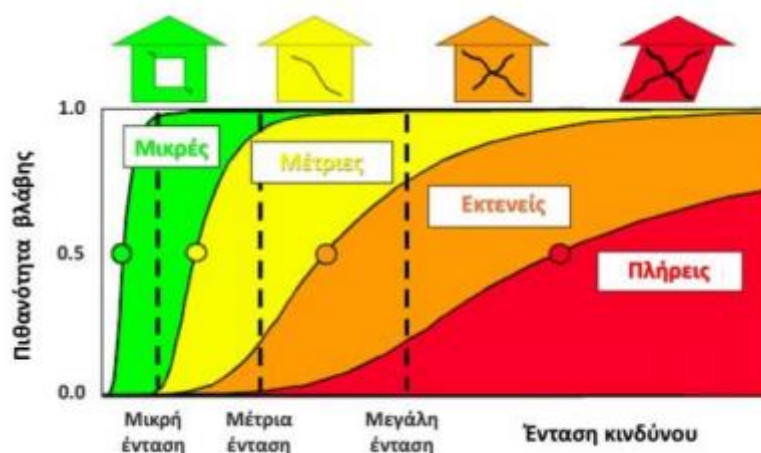
1.1.3 Σεισμική Τρωτότητα

Ως σεισμική τρωτότητα (Seismic Vulnerability) ορίζεται η πιθανότητα να συμβεί ένας βαθμός βλάβης για μία δεδομένη σεισμική ένταση. Προκαταστροφικά η πιθανότητα εκτιμάται ως ποσοστό των βλαβών που θα εμφανιστούν σε μια κατασκευή, ενώ μετακαταστροφικά αξιολογείται ο βαθμός βλάβης στην περίπτωση ισχυρών σεισμικών δονήσεων (Μπάρλα , 2004).

Τα τελευταία χρόνια απαραίτητο «εργαλείο» για την εκτίμηση και διαχείριση του σεισμικού κινδύνου αποτελούν οι καμπύλες τρωτότητας (vulnerability curves) ή αλλιώς καμπύλες ευθραυστότητας (fragility curves). Οι καμπύλες τρωτότητας δίνουν τις κάθε είδους βλάβες που παρουσιάζονται για κάθε είδους κίνδυνο (κτιριακές, οικονομικές βλάβες, απώλειες χρόνου κλπ.) και ορίζεται ως ο βαθμός απωλειών (damage states) που θα προκύψουν για μια δεδομένη στάθμη επικινδυνότητας, περιγράφοντας το λόγο των αναμενόμενων απωλειών προς τις μέγιστες πιθανές απώλειες σε μελλοντικούς σεισμούς. Ενώ οι καμπύλες ευθραυστότητας περιγράφουν την πιθανότητα εμφάνισης κάθε επιπέδου βλάβης στις κατασκευές, υπό συγκεκριμένη σεισμική δράση. Κατηγοριοποιούνται σε μηδενικές, μικρές, μέτριες, εκτενείς καθώς και σε καθολικό επίπεδο βλαβών. Κάθε επίπεδο βλάβης, περιγράφει το βαθμό στον οποίο έχει επηρεαστεί λειτουργικότητα της κατασκευής.

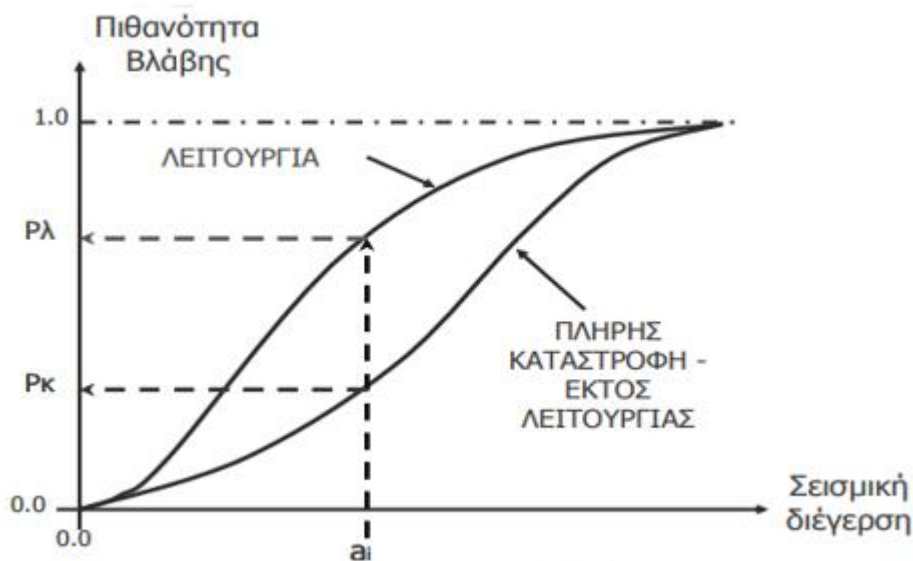
Άλλη κατηγοριοποίηση προβλέπει ότι συνηθέστερα τα επίπεδα βλαβών κατατάσσονται σε ελαφριά (slight), μέτρια (moderate), εκτεταμένη (extensive) ή οιονεί/καθολική (complete) βλάβη και αντιστοιχούν σε τέσσερις χρωματικές κατηγορίες (πράσινη, κίτρινη, πορτοκαλί και κόκκινη σήμανση), τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.4.

Μία κατασκευή πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντέξει σε ένα φάσμα σεισμικών φορτίσεων (για διάφορα επίπεδα λειτουργικότητας). Η κατασκευή πρέπει να παραμένει λειτουργική (πράσινη σήμανση), για τους συνηθέστερους σεισμούς. Για πιο σπάνιους σεισμούς επιτρέπονται επισκευές (κίτρινη σήμανση), ενώ για περισσότερο σπάνιους και καταστροφικούς σεισμούς θα πρέπει να αποφεύγεται η ολική κατάρρευση (κόκκινη σήμανση). Στην περίπτωση όμως ενός ακραίου σεισμού που έχει ελάχιστη πιθανότητα να συμβεί, η κατασκευή δεν θα μπορέσει να αντέξει και θα καταρρεύσει.



Σχήμα 1.4: Καμπύλες Τρωτότητας με τέσσερις στάθμες βλάβης

Οι καμπύλες που δίνουν μία εικονογράφιση της σχέσης «σεισμική διέγερση – βλάβη» φαίνονται στο Σχήμα 1.5 (Σταματάκης, 2012).



Σχήμα 1.5: Σχέση Σεισμικής Διέγερσης – Βλάβης

Σκοπός της αποτίμησης της σεισμικής τρωτότητας μίας κατασκευής είναι να βρεθεί ο βαθμός βλάβης για ένα επίπεδο σεισμικής έντασης που περιλαμβάνονται σε ένα δίκτυο. Συνδυάζεται η ένταση του σεισμού με την πιθανότητα η κατασκευή να φτάσει σε ένα δεδομένο επίπεδο ζημιών.

Δείκτης τρωτότητας μπορεί να είναι ακόμη ο λόγος των ανθρώπινων θυμάτων προς το συνολικό πληθυσμό, καθώς και το κόστος αποκατάστασης προς το κόστος ανακατασκευής. Δύο εκτιθέμενα στον ίδιο κίνδυνο στοιχεία δεν παρουσιάζουν την ίδια διακινδύνευση, εάν χαρακτηρίζονται από διαφορετική τρωτότητα στο συγκεκριμένο κίνδυνο. Διαφοροποιούνται ως προς την ικανότητα αντιμετώπισης του καταστροφικού φαινομένου και θα πρέπει να μπορεί να προβλεφθεί η αστοχία που θα επέλθει..

Στην πορεία της εργασίας θα χρησιμοποιηθούν μεθοδολογίες όπως οι HAZUS, SRM-LIFE και American Lifelines Alliance (ALA).

Η μεθοδολογία HAZUS θεωρείται η πιο ολοκληρωμένη μεθοδολογία υπολογισμών καμπυλών τρωτότητας και αποτελεί την πρώτη έκδοση λογισμικού που δημιουργήθηκε από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Εκτάκτων Αναγκών των ΗΠΑ (Federal Emergency Management Agency – FEMA). Με τις σχέσεις τρωτότητας που χρησιμοποιεί γίνεται αποτίμηση στο επίπεδο αστοχίας, εκτιμάει τις φυσικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις και παρέχει χάρτες από ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών που βοηθούν στη διαχείριση του σεισμικού κινδύνου και στη δυνατότητα εναλλακτικών λύσεων παρέμβασης για τη μείωση τους (Εμμανουηλίδου, 2019).

Στο πρόγραμμα SRM-LIFE, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης των δικτύων κοινής ωφέλειας, η οποία ανταποκρίνεται στα δεδομένα και στις ανάγκες της Ελληνικής πρακτικής.

Τέλος η μεθοδολογία εκτίμησης της διακινδύνευσης της American Lifelines Alliance συντάθηκε από την FEMA και την Αμερικάνικη Εταιρεία Πολιτικών Μηχανικών (ASCE). Αφορά τη μείωση κινδύνου σε συστήματα ύδρευσης και μεταφοράς από φυσικούς κινδύνους.

1.1.4 Δείκτες Έντασης Σεισμού

Τα χαρακτηριστικά των κινήσεων του εδάφους που επηρεάζουν τη σεισμική απόκριση και τις Γραμμές Ζωής είναι η ένταση, η συχνότητα και η διάρκεια τους. Κάθε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά της κίνησης του εδάφους σε μία τοποθεσία επηρεάζεται από το είδος της μετακίνησης ρήγματος (π.χ. κανονικό ή ανάστροφο), την πορεία που ακολουθούν τα σεισμικά κύματα καθώς διαδίδονται από το επίκεντρο του σεισμού προς την επιφάνεια του εδάφους και την τοπογραφία. Η ένταση της σεισμικής διέγερσης συνήθως εκφράζεται χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που δίνονται παρακάτω:

- Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση εδάφους (PGA_H)
- Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση εδάφους (PGA_V)
- Χρόνο – ιστορία επιτάχυνσης (a(t))
- Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα εδάφους (PGV_H)
- Μέγιστη κατακόρυφη ταχύτητα εδάφους (PGV_V)
- Μέγιστη εδαφική παραμόρφωση (PGD)
- Φασματική επιτάχυνση (SA)
- Φασματική ταχύτητα αντίδρασης (SV)
- Φασματική εδαφική παραμόρφωση (SD)

Η κατάλληλη παράμετρος έντασης του σεισμού, περιγράφει την απόκριση κάθε συνιστώσας, ελαχιστοποιεί τη διασπορά της απόκρισης και σχετίζεται με την προσέγγιση για την παραγωγή των καμπυλών τρωτότητας (Σταματάκης, 2012).

1.1.5 Μέθοδοι Εκτίμησης Καμπυλών Τρωτότητας

Οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των καμπυλών τρωτότητας ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες (Kassem, et al., 2020) και (Κάππος, 2012):

- Εμπειρικές (empirical)
- Αναλυτικές (analytical)
- Υβριδικές (hybrid)

Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται παρακάτω περιέχουν αβεβαιότητες από τον προσδιορισμό του σεισμικού κινδύνου αλλά και από την απόκριση στο συγκεκριμένο κίνδυνο. Άλλοι ερευνητές αναφέρουν μια διαφορετική ταξινόμηση των μεθοδολογιών εκτίμησης (Κέρπελης, 2023).

1.1.6 Εμπειρική Μέθοδος

Η εμπειρική μέθοδος στηρίζεται σε παρατηρήσεις και ελέγχους που γίνονται οπτικά και δίνουν την απόκριση των κατασκευών από διάφορες φορτίσεις. Οι παρατηρήσεις μπορούν να λαμβάνονται μέσω πειραμάτων ή μπορεί να συλλέγονται από δεδομένα παλαιότερων σεισμών. Αυτό προϋποθέτει ότι ένα πλήθος παρατηρήσεων καταγράφονται σε συνάρτηση με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά και τις αλληλεπιδράσεις των κατασκευών.

Η εμπειρική μέθοδος πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Με την ταξινόμηση της κάθε κατασκευής σε μία κατηγορία τρωτότητας και δεύτερον με την αξιολόγηση δηλαδή την βαθμολόγηση της κατασκευής βάση της σεισμικής επάρκειας της.

Τα αποτελέσματα της εμπειρικής μεθόδου προκύπτουν από την πραγματική συμπεριφορά των κατασκευών όμως δεν μπορούν να επιβεβαιωθούν μέσω εργαστηριακών δοκιμών, διότι απαιτούν δοκιμή πολλών μοντέλων σε αστοχία η οποία στοιχίζει χρόνο και χρήμα.

1.1.7 Αναλυτική Μέθοδος

Βασίζεται σε μοντέλα που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά της κατασκευής στην οριακή της κατάσταση και προϋποθέτει λεπτομερή στοιχεία της κατασκευής. Λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες των υλικών κατασκευής, η γεωμετρία και οι διαστάσεις, καθώς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την συμπεριφορά της κατασκευής.

Γίνονται αναλύσεις των κατασκευών και υπολογισμοί με κατάλληλα υπολογιστικά προγράμματα, ώστε να εκτιμηθεί ο βαθμός βλάβης του κάθε στοιχείου αλλά και του γενικού συνόλου της κατασκευής (Παππάς, 2020).

1.1.8 Υβριδική Μέθοδος

Για την ανάπτυξη καμπυλών τρωτότητας, η υβριδική (ή σύνθετη) προσέγγιση χρησιμοποιεί το συνδυασμό δύο ή περισσότερων από τις παραπάνω μεθόδους. Συνδυάζει τα πραγματικά στατιστικά στοιχεία βλαβών προηγούμενων σεισμών με τα αποτελέσματα ανελαστικών δυναμικών αναλύσεων για επιλεγμένες σεισμικές διεγέρσεις (Κάππος, κ.α., 2006).

Σκοπός της υβριδικής μεθόδου είναι η ελάττωση των μειονεκτημάτων των προηγούμενων μεθόδων και η δημιουργία μίας κατάστασης που ανταποκρίνεται ολοένα και περισσότερο στην πραγματικότητα (Τσουμάνη, 2023).

Κάθε προσέγγιση διαφέρει ως προς την εφαρμογή και την ακρίβεια που προσδίδει στα αποτελέσματα. Καμία μέθοδος δεν είναι βέλτιστη. Η επιλογή μεθόδου περιλαμβάνει την εξισορρόπηση κόστους και ακρίβειας των αποτελεσμάτων που απαιτούνται για την εφαρμογή της κάθε μεθόδου.

1.1.9 Υπολογισμός Καμπυλών Τρωτότητας

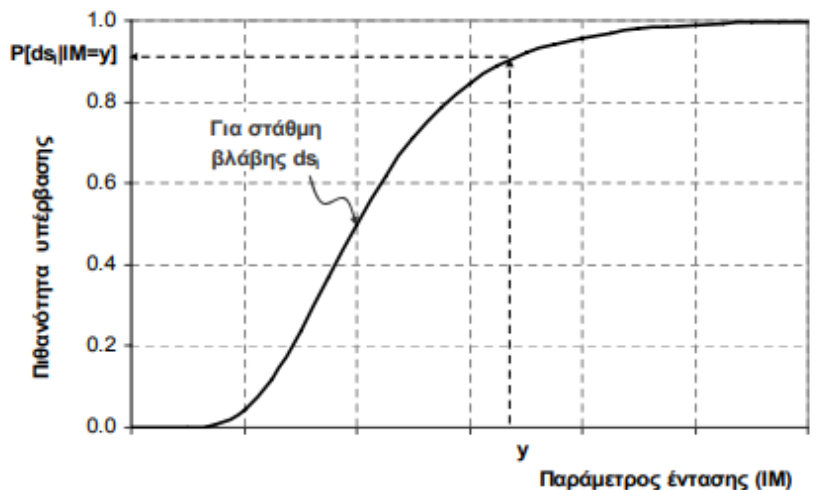
Οι καμπύλες τρωτότητας δίνουν την πιθανότητα ενός στοιχείου να υποστεί βλάβη ή να υπερβεί ένα καθορισμένο όριο βλάβης κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής έντασης. Συνήθως, οι καμπύλες τρωτότητας παρουσιάζονται ως λογαριθμικές συναρτήσεις κανονικής κατανομής (μέσης τιμής και διασποράς) για κάθε επίπεδο βλάβης (Αλεξούδη, κ.α., 2008).

Στην παρακάτω εξίσωση δίνεται η πιθανότητα (P) υπέρβασης μίας στάθμης βλάβης για ένα μέτρο έντασης (Petridis, et al., 2019).

$$P[DS_i|IM] = \Phi\left(\frac{\ln(IM) - \ln(\overline{IM})}{\beta}\right)$$

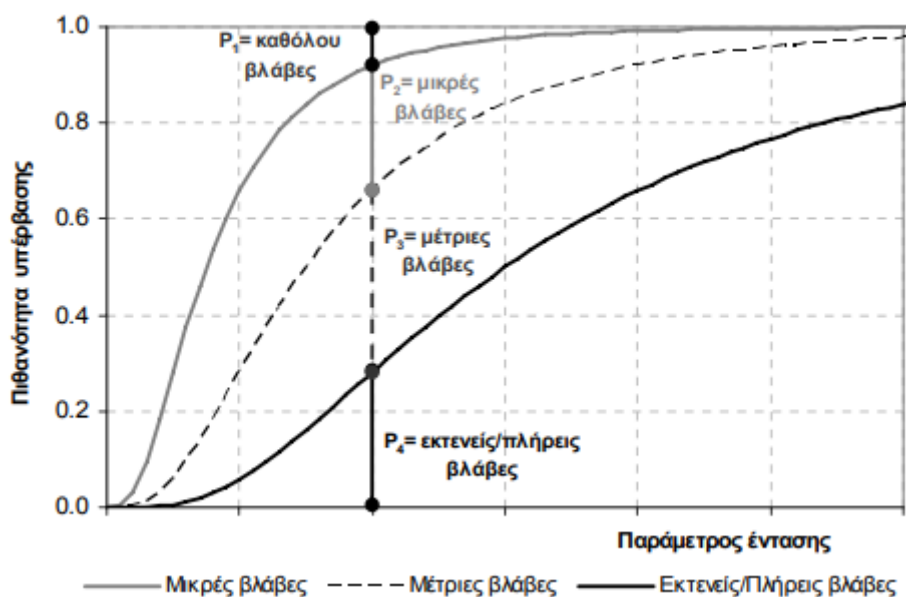
Όπου,

- Φ είναι η συνάρτηση κανονικής κατανομής
- IM είναι το μέτρο έντασης του σεισμού σε σεισμική επιτάχυνση PGA
- \overline{IM} είναι η μέση τιμή του μέτρου έντασης
- β είναι η τυπική απόκλιση
- D_{si} είναι η στάθμη βλάβης ($i = 0, 1, 2, 3$) για τις τέσσερις στάθμες βλάβης



Σχήμα 1.6: Παράδειγμα καμπύλης τρωτότητας

Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται ως παράδειγμα η απεικόνιση της καμπύλης τρωτότητας, όπου φαίνεται η πιθανότητα P του εκτιθέμενου σε κίνδυνο στοιχείου να υπερβεί μία συγκεκριμένη στάθμη βλάβης. Επίσης, στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζεται η πιθανότητα υπέρβασης όλων δηλ. των τεσσάρων σταθμών βλάβης (Αργυρούδη, 2010).



Σχήμα 1.7: Πιθανότητα υπέρβασης των τεσσάρων σταθμών βλάβης

Κάθε καμπύλη τρωτότητας ορίζεται με τη βοήθεια παραμέτρων, της μέσης τιμής της PGA για την οποία το κτίριο εισέρχεται στη στάθμη βλάβης και της (λογαριθμικής) τυπικής απόκλισης β . Αυτές

Οι τιμές υπολογίζονται ως μέσες τιμές της PGA για κάθε στάθμη βλάβης, υπολογισμένα από τα διαγράμματα εξέλιξης βλάβης. Η τυπική απόκλιση β της λογαριθμικής κατανομής, αντιπροσωπεύει ένα σύνολο αβεβαιοτήτων στην κάθε καμπύλη τρωτότητας, η οποία δεν είναι η ίδια για όλες τις στάθμες βλάβης.

Οι αβεβαιότητες μίας οριακής κατάστασης δίνονται από την σχέση σύμφωνα με τεχνικό manual Ινστιτούτου των ΗΠΑ (NIBS, 2004):

$$\beta = \sqrt{\beta d^2 + \beta c^2 + \beta DS^2}$$

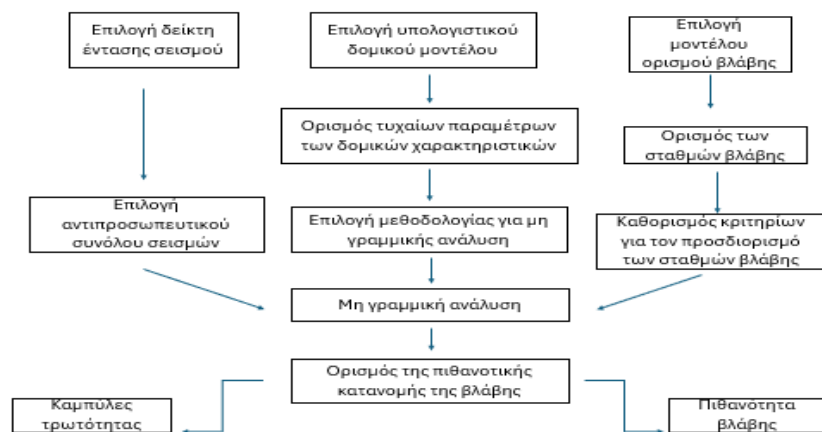
Όπου,

- βd : η αβεβαιότητα της σεισμικής απαίτησης και των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης και υπολογίζεται από τη διασπορά των δυναμικών αναλύσεων
- βc : η αβεβαιότητα της αντοχής και της απόκρισης της κατασκευής
- βds : η αβεβαιότητα των σταθμών βλάβης

Η αστοχία μίας κατασκευής προσδιορίζει την ικανότητα της να παρέχει ένα επίπεδο λειτουργικότητας όταν αυτό υπερβεί ένα επίπεδο βλάβης. Δηλαδή όταν παρουσιαστεί αστοχία υποδηλώνει με αυτόν τον τρόπο ότι η λειτουργία της κατασκευής είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο όριο.

Η εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας γίνεται με τη χρήση των μεθόδων της γραμμικής στατικής Υπερωθητικής ανάλυσης (Push over), της φασματικής ικανότητας και της προσαυξητικής δυναμικής ανάλυσης (Incremental Dynamic Analysis – IDA). Σύμφωνα με τη FEMA η μέθοδος της προσαυξητικής ανάλυσης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των σταθμών βλάβης μίας κατασκευής (Κακαλέτρης, 2024). Οι στάθμες βλάβης ορίζονται στη στάθμη μικρών βλαβών SD (πλήρης λειτουργία του κτιρίου), μέτριων MD (επισκευάσιμο κτίριο), εκτεταμένων ED (μη επισκευάσιμο κτίριο) και στη στάθμη ολοκληρωτικών βλαβών CD (υπό κατάρρευση κτίριο).

Μέσω των καμπυλών IDA (IDA curves) δίνεται το διάγραμμα συναρτήσεως της κατάστασης μίας κατασκευής με το μέτρο έντασης του σεισμού ή με το μέτρο βλάβης και μπορεί να απεικονισθεί σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις, ανάλογα με τον αριθμό των Μέτρων Έντασης (IM). Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των συνιστωσών για τον υπολογισμό των καμπυλών τρωτότητας.



Σχήμα 1.8: : Διάγραμμα ροής για την περιγραφή των συνιστωσών υπολογισμού καμπυλών τρωτότητας και της πιθανότητας βλάβης.

2. ΜΕΡΟΣ Β:

2.1 Καμπύλες Τρωτότητας Κτιριακών Έργων

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για πρόβλεψη και αντιμετώπιση των επιπτώσεων ενός σεισμικού γεγονότος σε μία περιοχή έχει αυξηθεί. Επιβάλλεται η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου και της τρωτότητας των κτιρίων που βρίσκονται στην περιοχή αυτή (Kyriakidis, et al., 2007). Παρά την εφαρμογή των αντισεισμικών κανονισμών, το μεγαλύτερο ποσοστό υφιστάμενων κτιρίων έχουν κατασκευαστεί πριν την ένταξη τους.

Για τον καθορισμό της απόκρισης του κτιρίου για ένα συγκεκριμένο σεισμικό κίνδυνο, η δυναμική μη – γραμμική ανάλυση, αποτελεί την πιο κοστοβόρα μέθοδο. Η δημιουργία αναλυτικών καμπυλών τρωτότητας, απαιτεί χρόνο και μεγάλο αριθμό επιταχυνσιογραφημάτων. Η εναλλακτική μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση της καμπύλης αντοχής του κτιρίου με το φάσμα απόκρισης του σεισμικού κινδύνου στην υπό εξέταση περιοχή και αποτελεί πλέον τη συνήθη διαδικασία για τον καθορισμό της σεισμικής απόκρισης κτιρίων.

2.1.1 Καμπύλες Τρωτότητας Κτιρίων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Η δημιουργία καμπυλών τρωτότητας για κτίρια από Οπλισμένο Σκυρόδεμα στην Ελλάδα κρίνεται αναγκαία λόγω του μεγάλου αριθμού κτιρίων τα οποία έχουν κατασκευαστεί χωρίς τον αντισεισμικό σχεδιασμό ή με παλιούς αντισεισμικούς. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον αυξημένο σεισμικό κίνδυνο τα τελευταία χρόνια δημιουργεί την ανάγκη εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας για σκοπούς πρόληψης και προετοιμασίας αντιμετώπισης τυχόν ζημιών από μελλοντικούς σεισμούς. Τα κτίρια διακρίνονται σε κατηγορίες με βάση χαρακτηριστικά τους (όπως το ύψος τους) και με βάση την ύπαρξη ή μη (είτε ελλιπούς) αντισεισμικού σχεδιασμού, πχ σχεδιασμός με πλήρη έλλειψη αντισεισμικού κανονισμού έως τον αντισεισμικό σχεδιασμό με βάση τον Ευρωκώδικα 8 (EC8). Οι καμπύλες τρωτότητας παρουσιάζουν αύξηση των ζημιών των κτιρίων χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό προτού το επιτρεπόμενο όριο αστοχίας. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι αυτό οφείλεται σε μη πλαστικούς τύπους αστοχίας. Το σχήμα των καμπυλών τρωτότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επιλεγμένο φάσμα απόκρισης του σεισμικού κινδύνου (Kyriakidis, et al., 2007).

Η σημαντικότερη παράμετρος της μη γραμμικής σεισμικής συμπεριφοράς είναι η λεπτομερής προσομοίωση των δομικών στοιχείων της κατασκευής που έχει επιλεγεί. Τα κτίρια επιλέγονται ανά κατηγορίες και χωρίζονται με τα κριτήρια μορφολογίας (ύψος, ηλικία, φέρον σύστημα) και την κατασκευαστική διαμόρφωση (βλέπε Πίνακας 2.1) που εμφανίζεται στον ελληνικό αλλά και ευρωπαϊκό χώρο. Μεγάλης σημασίας αποτελεί η επιλογή των επιταχυνσιογραφημάτων που χρησιμοποιούνται ως διεγέρσεις για τις ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές τοπικές εδαφικές συνθήκες (Κάππος, κ.α., 2006).

Σε τυπικές κατηγορίες κτιρίων συχνά δεν καταγράφονται όλα τα απαραίτητα δομικά χαρακτηριστικά (Κάππος, 2012).

Πίνακας 2.1: Συνήθεις τύποι κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος στην Ελλάδα

Κωδικός	Περιγραφή
C1	Πλαίσια Ο/Σ
C2	Τοιχώματα Ο/Σ με δύσκαμπτα διαφράγματα
C3	Πλαίσια Ο/Σ με τοιχοποιία πλήρωσης και δύσκαμπτα διαφράγματα
PC	Προκατασκευασμένα στοιχεία Ο/Σ
URM1	Τοίχοι από φέρουσα άοπλη τοιχοποιία με εύκαμπτα διαφράγματα
URM2	Τοίχοι από φέρουσα άοπλη τοιχοποιία με δύσκαμπτα διαφράγματα

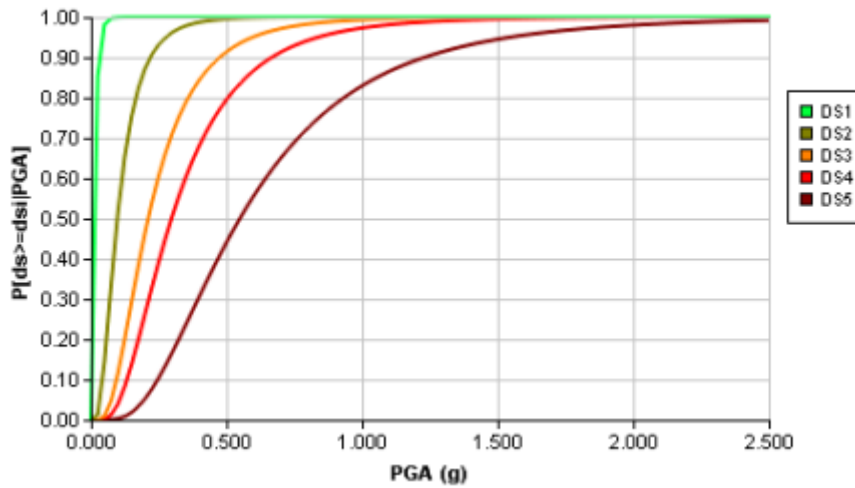
2.1.2 Καμπύλες Τρωτότητας Κτιρίων κατά ΒΔ '59 και ΕΑΚ2000

Παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας χρησιμοποιώντας την υβριδική μέθοδο σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος, όπου μελετήθηκε βάση της μεθοδολογίας (HAZUS, 2020) για περιπτώσεις τυπικών κτιρίων που συναντώνται στην Ελλάδα, αλλά και στην Ευρώπη γενικά. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των κτιρίων που είχαν σχεδιαστεί με τον ΒΔ '59 και με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2000).

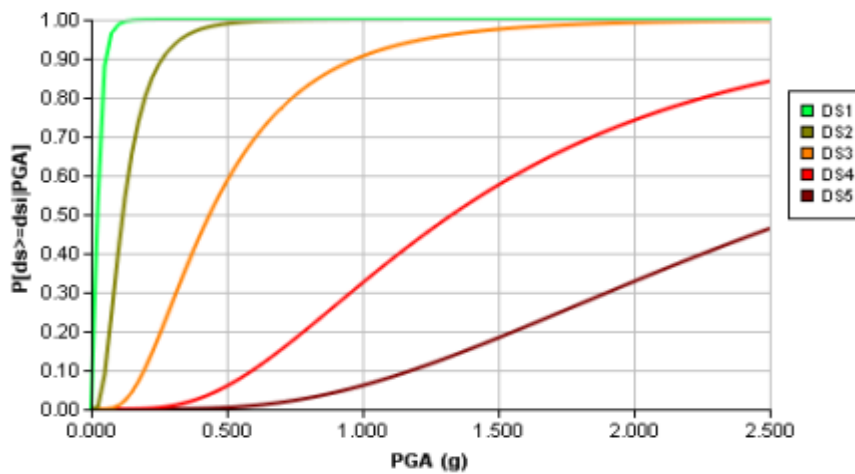
Για την εξαγωγή καμπυλών τρωτότητας χρησιμοποιήθηκαν κτίρια μεγάλου ύψους με τοιχοπληρώσεις από οπτοπλινθοδομή και κτίρια χωρίς τοιχοπληρώσεις. Επίσης διαχωρίζονται σε κανονικά τοιχοπληρωμένα σε όλους τους ορόφους τους, και σε τοιχοπληρωμένα σε όλους τους ορόφους αλλά χωρίς αυτόν του ισογείου (δημιουργώντας την περίπτωση πιλοτής και μικτά τοιχοπληρωμένα συστήματα). Στον Πίνακα 2.2 παρατίθενται οι στάθμες βλάβης (damage states) των κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος (Reinforced Concrete, R/C) (Karpos, et al., 2006).

Πίνακας 2.2: Στάθμες βλάβης και απωλειών για κτίρια Οπλισμένου Σκυροδέματος (R/C) (Karpos, et al., 2006)

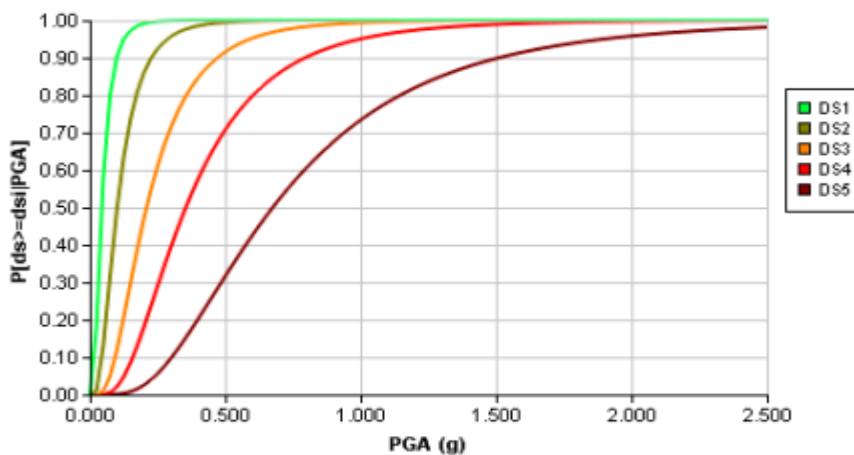
Επίπεδα Βλάβης (DS)	Κατάσταση Βλάβης	Εύρος δείκτη βλάβης %
Επίπεδα Βλάβης 0 (DS0)	Μηδενική	0
Επίπεδα Βλάβης 1 (DS1)	Ελαφριά	> 0-1
Επίπεδα Βλάβης 2 (DS2)	Μέτρια	>1-10
Επίπεδα Βλάβης 3 (DS3)	Εκτενείς	10-30
Επίπεδα Βλάβης 4 (DS4)	Βαριές	30-60
Επίπεδα Βλάβης 5 (DS5)	Κατάρρευση	60-100



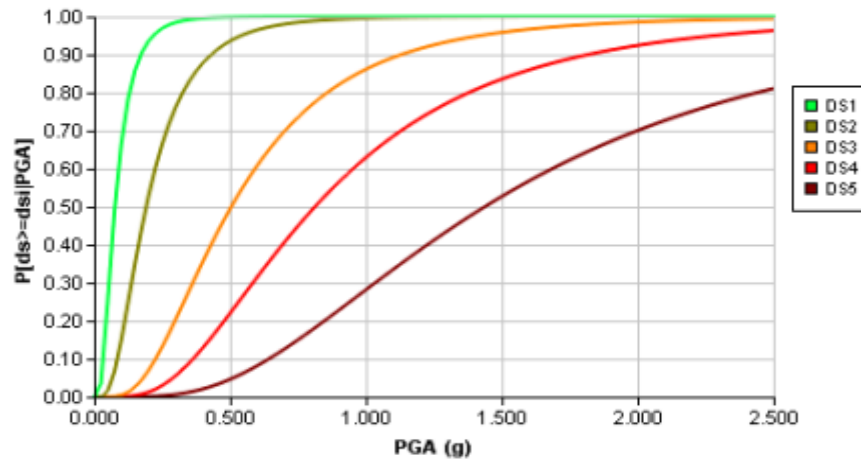
Σχήμα 2.1: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με κανονικές τοιχοπληρώσεις, βάση του ΒΔ '59 (Kappos, et al., 2006).



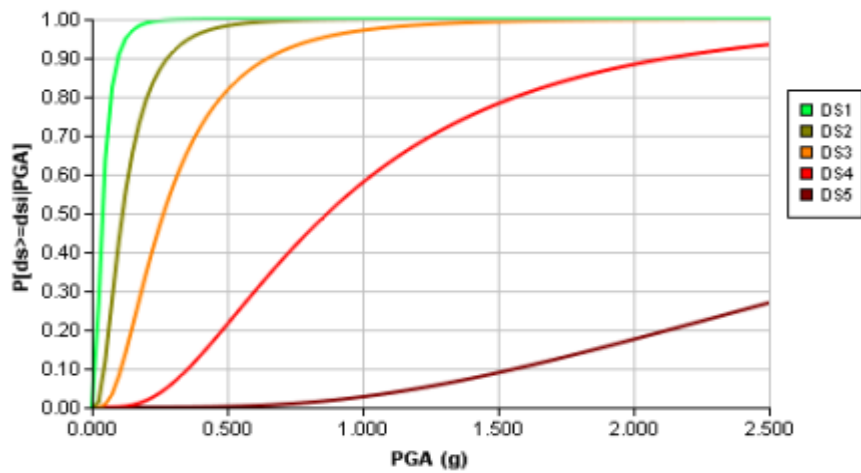
Σχήμα 2.2: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με κανονικές τοιχοπληρώσεις, βάση ΕΑΚ2000 (Kappos, et al., 2006).



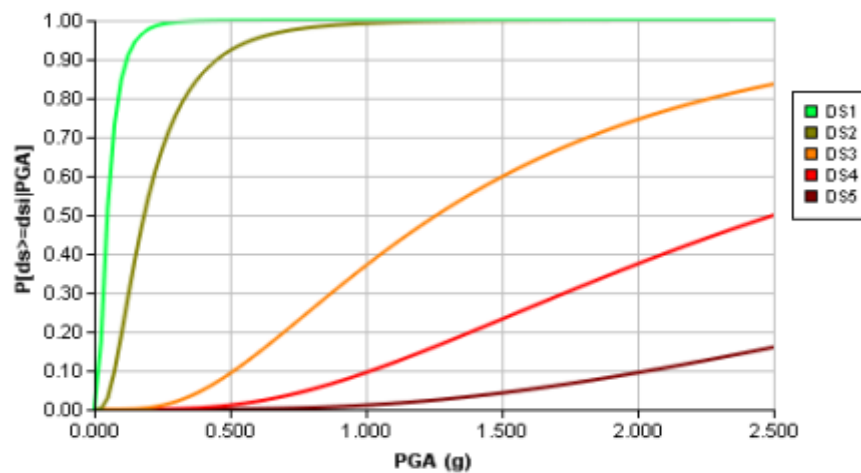
Σχήμα 2.3: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με πιλοτή, βάση ΒΔ '59 (Kappos, et al., 2006).



Σχήμα 2.4: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με πιλοτή, βάση ΕΑΚ2000 (Karros, et al., 2006).



Σχήμα 2.5: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με μικτό σύστημα βάση ΒΔ '59 (Karros, et al., 2006).



Σχήμα 2.6: Υβριδικές Καμπύλες Τρωτότητας σε όρους πιθανότητας βλάβης για διάφορες στάθμες βλάβης, σε κτίρια μεγάλου ύψους με μικτό σύστημα, βάση ΕΑΚ2000 (Karros, et al., 2006).

Αναλυτικότερα τα συστήματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.1 – 2.6 είναι τα τοιχοπληρωμένα κτίρια, τα κτίρια με πιλοτή και τα μεικτά συστήματα με τοιχοπληρώσεις. Τα σύγχρονα μελετημένα κτίρια (ΕΑΚ 2000) παρουσιάζουν μικρότερη τρωτότητα στις υψηλές στάθμες βλάβης, δηλαδή της βαρείας βλάβης και της κατάρρευσης. Οι διαφορές μεταξύ παλαιών κατασκευών με ΒΔ '59 και νέων με ΕΑΚ είναι εντονότερες στην περίπτωση των τοιχοπληρωμένων πλαισίων και υπάρχει μεγαλύτερη τρωτότητας σε αυτά κατά ΒΔ '59 (Kappos, et al., 2006).

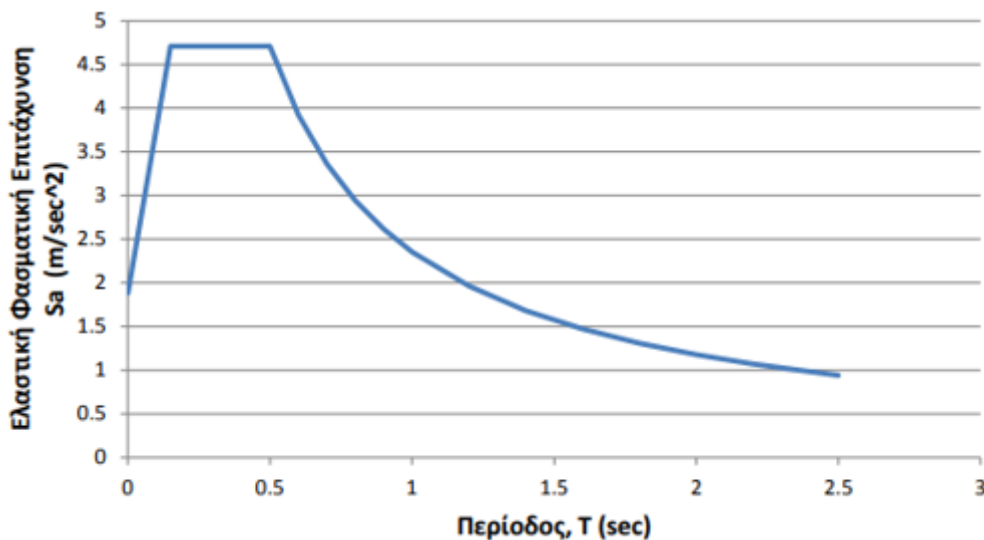
2.1.3 Καμπύλες Τρωτότητας Πολύωροφου Κτιρίου από Ω.Σ.

Η παρακάτω μελέτη (Κακαλέτρης, 2024) χρησιμοποιεί την αναλυτική μέθοδο υπολογισμού καμπυλών τρωτότητας με τη δυναμική ανελαστική ανάλυση. Χρησιμοποιείται η πρώτη ιδιοπερίοδος της κατασκευής με απόσβεση 5% ($S_a(T1,5\%)$).

Το υπό εξέταση πολύωροφο κτίριο αποτελείται από έξι (6) ορόφους. Η κάτοψη έχει σχήμα ορθογώνιο και στις όψεις υπάρχουν για κάθε όροφο συνολικά τρεις πρόβολοι. Ο φέρων οργανισμός κατασκευάστηκε από οπλισμένο σκυρόδεμα και η θεμελίωση με κοιτόστρωση με ποιότητα σκυροδέματος C20/25 και χάλυβα B500C και η πλήρωση έγινε από οπτοπλινθοδομή. Το στατικό σύστημα είναι τοιχωματικό και στις δύο διευθύνσεις.

Το κτίριο κατασκευάστηκε σε περιοχή που ανήκει σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z1 και ανήκει στην κατηγορία σπουδαιότητας II με έδαφος θεμελίωσης κατηγορίας B. Η προσομοίωση του κτιρίου έγινε με το λογισμικό OpenSEES (Open-Source System for Earthquake Engineering Simulation) και η κατασκευή των καμπυλών τρωτότητας βάσει του Ευρωκώδικα 8 (Κακαλέτρης, 2024).

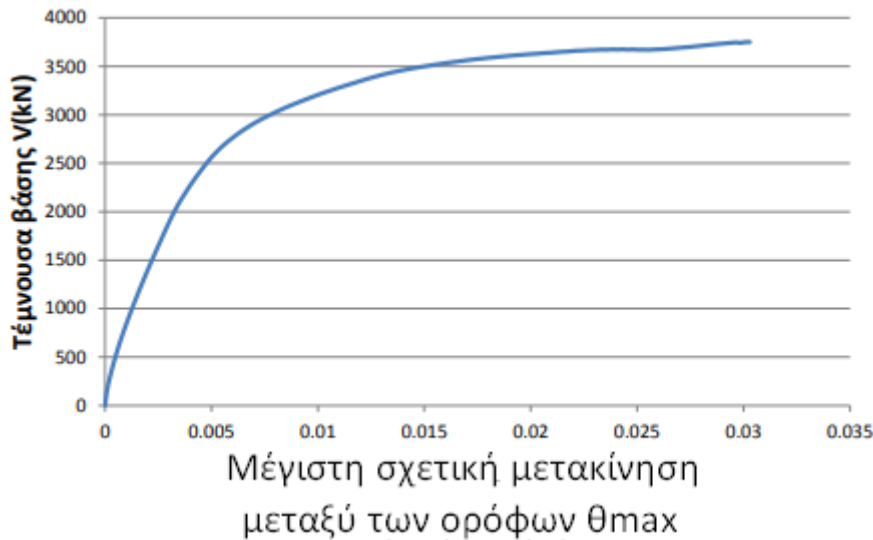
Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το ελαστικό φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση σχεδιασμού με τον Ευρωκώδικα 8 (EC-8).



Σχήμα 2.7: Ελαστικό Φάσμα Σχεδιασμού - EC8 (Κακαλέτρης, 2024).

Αρχικά κατασκευάστηκε η καμπύλη ικανότητας με τη μη γραμμική ανάλυση (Pushover), όπου σε κάθε όροφο επιλέχθηκε ένας κόμβος ελέγχου, ώστε να υπάρχει υπολογισμός των μετατοπίσεων των

κόμβων σε κάθε βήμα της μη γραμμικής ανάλυσης και της σχετικής μέγιστης μετακίνησης των ορόφων.



Σχήμα 2.8: Καμπύλη Ικανότητας στη διαμήκη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).

Με την καμπύλη ικανότητας (Σχήμα 2.8) γίνεται αντιστοίχιση με τα όρια των μεγίστων σχετικών μετακινήσεων μεταξύ των ορόφων $\theta_{max,ds}$ των τριών σταθμών επιτελεστικότητας υπολογίζοντας τις μετακινήσεις κορυφής, ($\Delta_{top,ds}$), για κάθε στάθμη.

Ο συντελεστής κλιμάκωσης του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού βάση του Ευρωκώδικα για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας, όπου η πρώτη ιδιοπερίοδος της κατασκευής $S_a(T1,5\%)$ είναι η φασματική επιτάχυνση σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού. Παρουσιάζονται οι Πίνακες 2.3 και 2.4 που απεικονίζουν τα όρια των σταθμών επιτελεστικότητας και τις τιμές του συντελεστή κλιμάκωσης λ_{ds} του ελαστικού φάσματος (Κακαλέτρης, 2024).

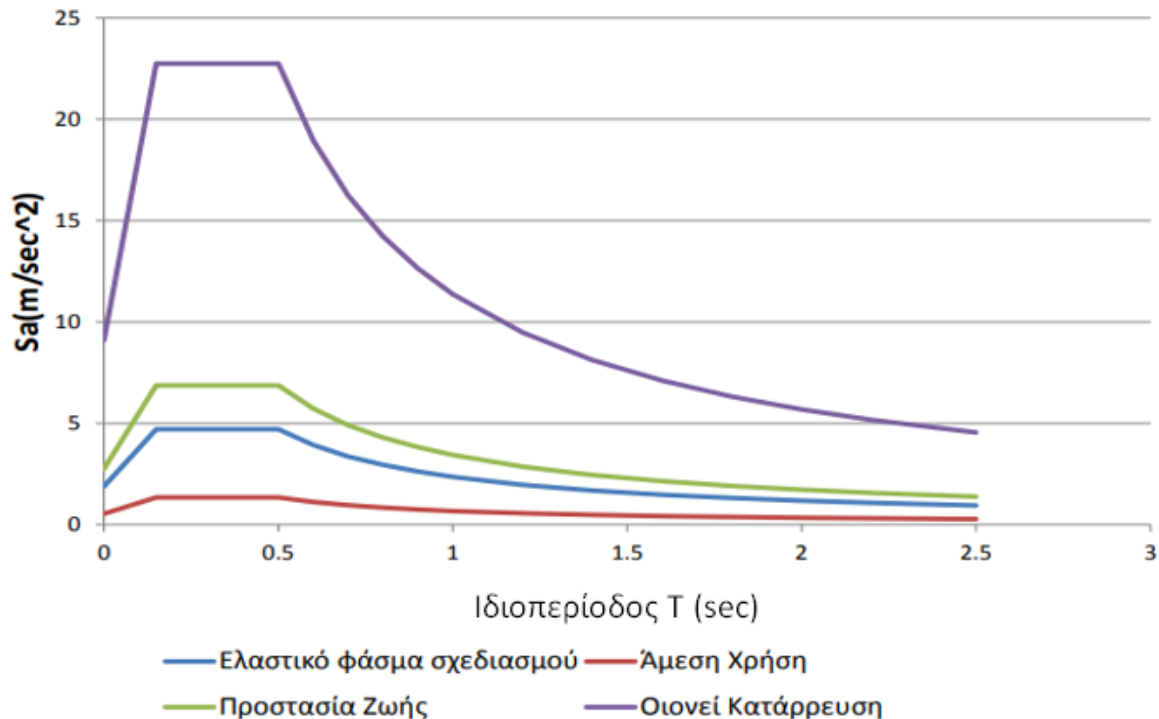
Πίνακας 2.3: Πίνακας σταθμών επιτελεστικότητας κατά τη διαμήκη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).

Στάθμη Επιτελεστικότητας	Μετακίνηση Ορόφων $\theta_{max,ds}$	Μετακίνηση κορυφής $\Delta_{top,ds}$ (m)	Στάθμη επιτελεστικότητας $S_{a,ds}$ (g)
Άμεση Χρήση	0.002	0.029189	0.06432
Προστασία Ζωής	0.010	0.14977	0.33007
Οιονεί Κατάρρευση	0.030	0.496595	1.09297

Πίνακας 2.4: Συντελεστής Κλιμάκωσης Ελαστικού Φάσματος κατά τη διαμήκη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).

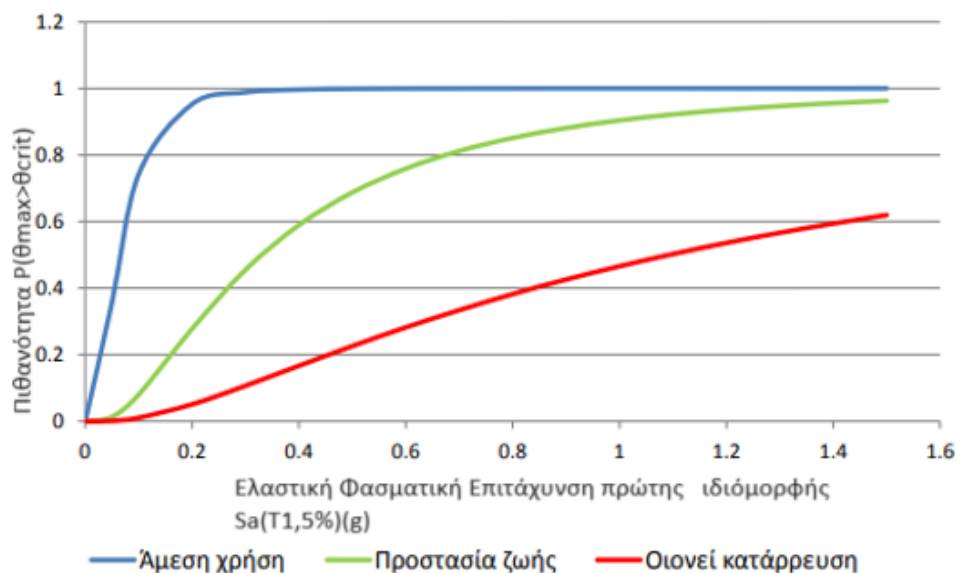
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Συντελεστής Κλιμάκωσης λ_{ds}
Άμεση Χρήση	0.2842
Προστασία Ζωής	1.4586
Οιονεί Κατάρρευση	4.830

Παρακάτω προκύπτει το Σχήμα 2.9 του ελαστικού φάσματος ανάλογα με τη στάθμη επιτελεστικότητας (σύμφωνα με τον Πίνακα 2.4).



Σχήμα 2.9: Κλιμάκωση Ελαστικού Φάσματος κατά τη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).

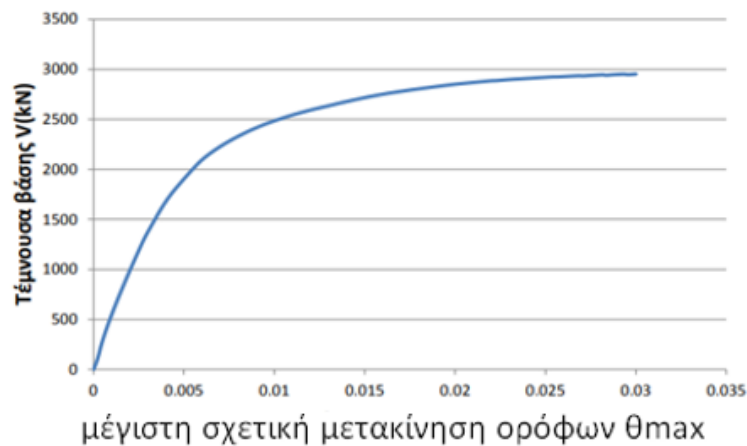
Οι καμπύλες που προκύπτουν με κριτήριο τη Φασματική Επιτάχυνση της πρώτης ιδιόμορφης με απόσβεση 5% κατά τη διεύθυνση X παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Καμπύλη Τρωτότητας με βάση το Φάσμα του Ευρωκώδικα και τη Μέθοδο των Συντελεστών κατά τη διεύθυνση X (Κακαλέτρης, 2024).

Συμπεραίνεται ότι όσο η στάθμη επιτελεστικότητας (επίπεδο βλάβης) γίνεται δυσμενέστερη (οιονεί κατάρρευση) τόσο μειώνεται η πιθανότητα υπέρβασης της θ_{max} .

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας στην εγκάρσια διεύθυνση Z. Χρησιμοποιείται η καμπύλη ικανότητας από το Σχήμα 2.11 δίνοντας το διάγραμμα τέμνουσας βάσης συναρτήσει της μέγιστης σχετικής μετακίνησης των ορόφων θ_{max} (Κακαλέτρης, 2024).



Σχήμα 2.11: Καμπύλη Ικανότητας κατά την εγκάρσια διεύθυνση Z

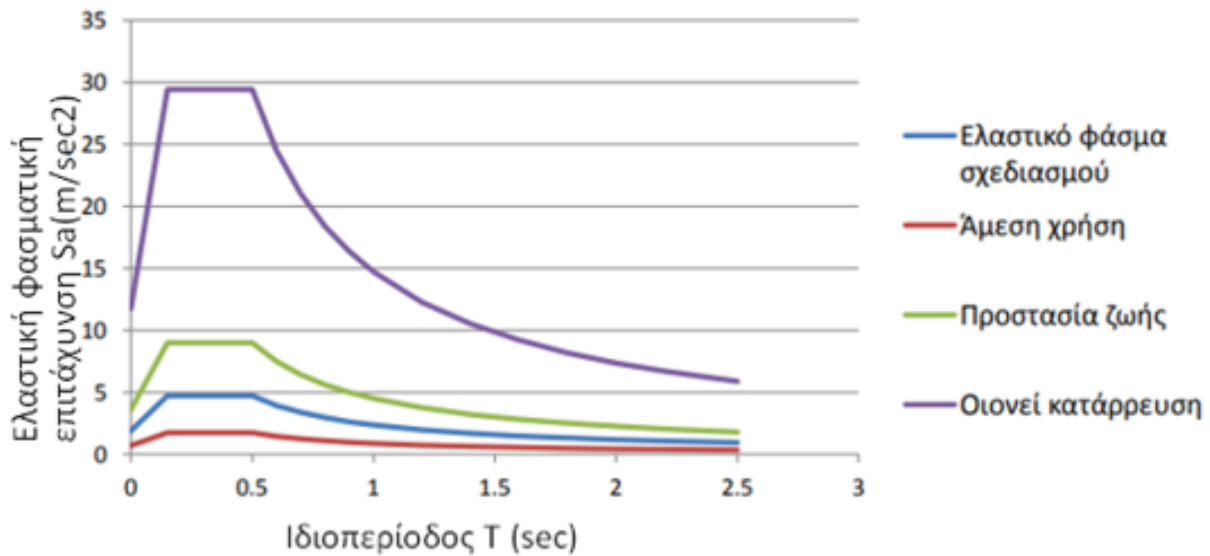
Πίνακας 2.5: Όρια σταθμών επιτελεστικότητας κατά τη διεύθυνση Z (Κακαλέτρης, 2024).

Στάθμη Επιτελεστικότητας	$\theta_{max,ds}$	$\Delta\tau_{op,ds}$ (m)	Sads (g)
Άμεση Χρήση	0.002	0.02954	0.1325
Προστασία Ζωής	0.010	0.15274	0.685
Οιονεί Κατάρρευση	0.030	0.50	2.243

Πίνακας 2.6: Συντελεστής κλιμάκωσης ελαστικού φάσματος κατά τη διεύθυνση Z (Κακαλέτρης, 2024).

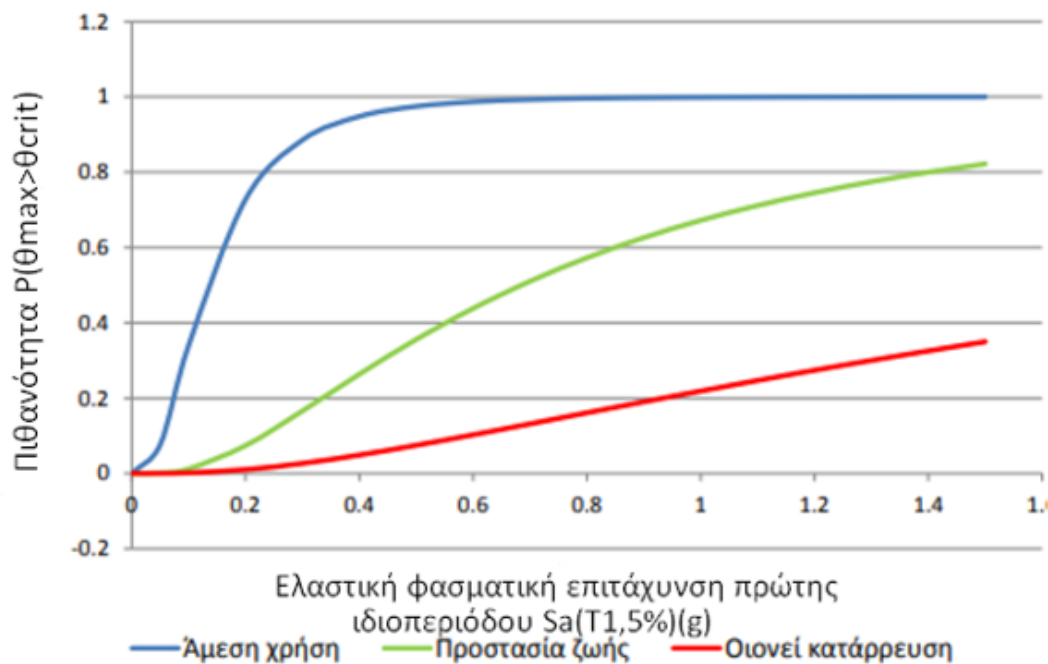
Στάθμη επιτελεστικότητας	Συντελεστής Κλιμάκωσης λ_{ds}
Άμεση Χρήση	0.3693
Προστασία Ζωής	1.9091
Οιονεί Κατάρρευση	6.25

Από τον Πίνακα 2.5 και Πίνακα 2.6 προκύπτουν οι κλιμακώσεις του ελαστικού φάσματος στο Σχήμα 2.12, ανάλογα τη στάθμη επιτελεστικότητας.



Σχήμα 2.12: Ελαστικό φάσμα κατά την εγκάρσια διεύθυνση Z (Κακαλέτρης, 2024).

Από το Σχήμα 2.13 της καμπύλης τρωτότητας κατά την εγκάρσια διεύθυνση Z, προκύπτει όπως και στην διαμήκη διεύθυνση ότι είναι δυσμενέστερη η στάθμη επιτελεστικότητας όσο μειώνεται η πιθανότητα υπέρβασης της μετακίνησης μεταξύ των ορόφων θ_{max} .

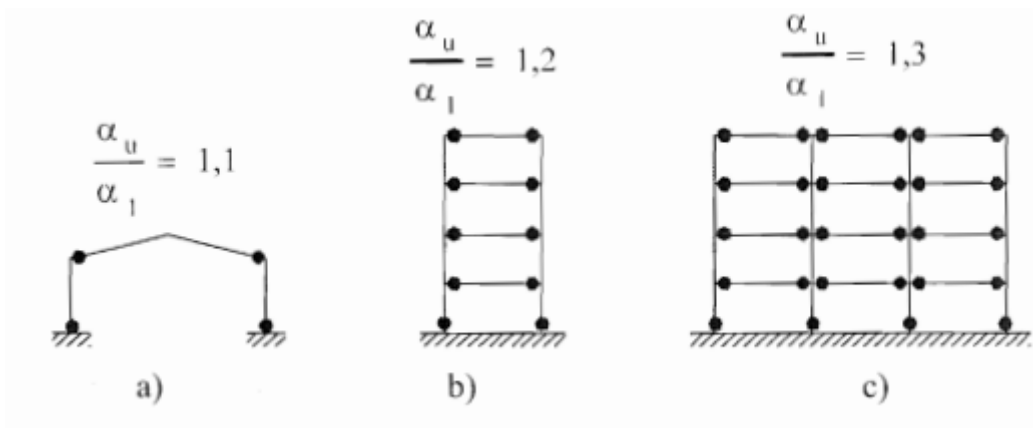


Σχήμα 2.13: Καμπύλη Τρωτότητας κατά τη διαμήκη διεύθυνση Z (Κακαλέτρης, 2024).

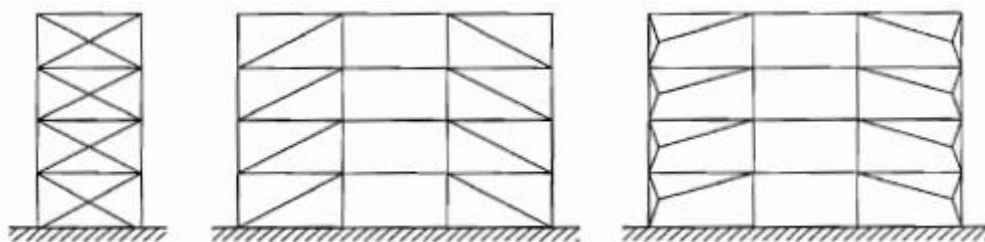
Παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα ότι οι καμπύλες που προκύπτουν με βάση τον Ευρωκώδικα 8 για τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση, ότι η πιθανότητα η κατασκευή να υπερβεί μία στάθμη επιτελεστικότητας (στάθμη βλάβης) είναι μεγαλύτερη κατά τη διαμήκη διεύθυνση (X).

2.1.4 Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικών Κατασκευών

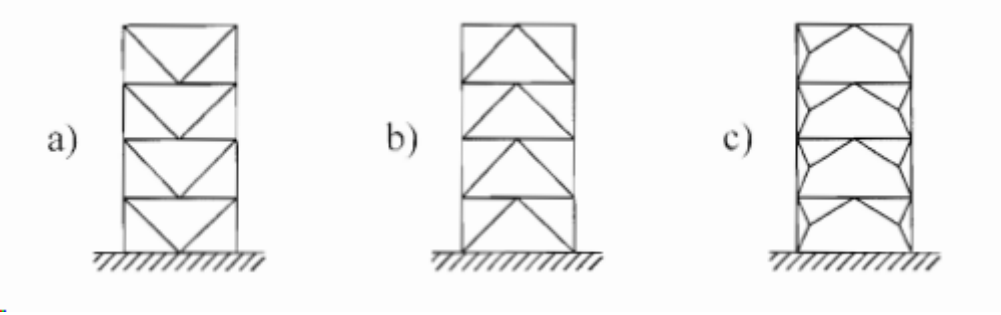
Η μελέτη μεταλλικών κτιρίων γίνεται με βάση τον αντισεισμικό κανονισμό του Ευρωκώδικα 8 (EC-8). Η επιλογή του στατικού συστήματος καθορίζει την παραλαβή των οριζόντιων μετακινήσεων υπό σεισμικές εντάσεις. Τα κυριότερα δομικά συστήματα για κατασκευές με υψηλή πλαστιμότητα όπου α_u/α_l οι λόγοι που χρησιμοποιούνται είναι τα πλαίσια παραλαβής ροπής (MRFs), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14, με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα (CBFs) στο Σχήμα 2.15 – 2.16, με συνδέσμους έκκεντρους (EBFs) στο Σχήμα 2.17 και με συστήματα πλαισίων με αναστραμμένο εκκρεμές, στην Σχήμα 2.18 (CEN, 2004).



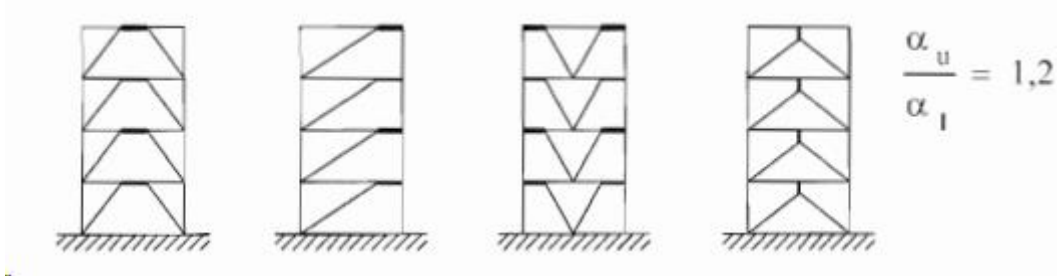
Σχήμα 2.14: Πλαίσια παραλαβής ροπής (ζώνες απόδοσης ενέργειας σε δοκούς και στην βάση των υποστυλωμάτων)



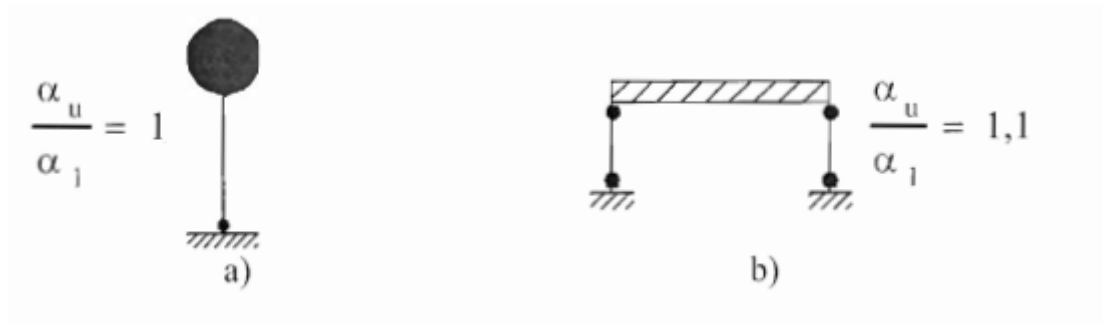
Σχήμα 2.15: Πλαίσια με διαγώνιους συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα (ζώνες απόδοσης ενέργειας σε εφελκόμενες διαγώνιους)



Σχήμα 2.16: Πλαίσια με V μορφής συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα (ζώνες απόδοσης ενέργειας οι εφελκόμενες και θλιβόμενες ζώνες)



Σχήμα 2.17: Πλαίσια με έκκεντρος συνδέσμους (ζώνες απόδοσης ενέργειας σε καμπτικούς συνδέσμους ή συνδέσμους τέμνουσας)



Σχήμα 2.18: Σύστημα ανεστραμμένου εκκρεμούς a) ζώνες απόδοσης ενέργεια στη βάση υποστυλωμάτων, b) ζώνες απόδοσης σε υποστυλώματα

Η θεμελίωση των κατασκευών μελετάται με την θεώρηση ότι η κατασκευή είναι πακτωμένη στο έδαφος. Αυτό είναι ένα ιδανικό σενάριο που η κατασκευή βρίσκεται σε βραχώδες υπόβαθρο και υπάρχει πλήρης πάκτωση. Όμως για να είναι ρεαλιστική η μελέτη ανάλυσης της κατασκευής θα πρέπει να συμπεριληφθεί η ενδοσιμότητα και η μεταβολή (παραμόρφωση) των ιδιοτήτων του εδάφους, δηλαδή η αποκόλληση ή δημιουργία κύλισης).

2.1.4.1 Καμπύλες Τρωτότητας Δύο Μεταλλικών Πλαισίων

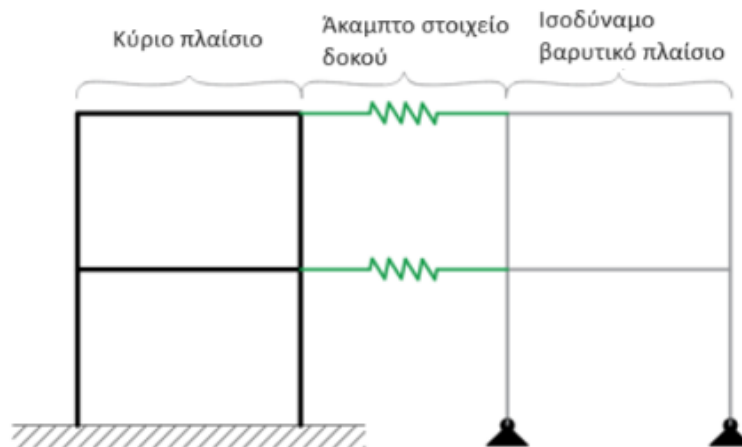
Ερευνητές εξέτασαν ένα δώροφο μεταλλικό πλαίσιο (MRF) και ένα δώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα (CBF), (Τσουμάνη, 2023). Τα μοντέλα προσομοιώθηκαν με τα λογισμικά FrameModeler – 2D και OpenSees. Στα μεταλλικά πλαίσια που παραλαμβάνουν ροπές οι οριζόντιες δυνάμεις παραλαμβάνονται από τα μέλη που ενεργούν καμπτικά. Τα πλαίσια αυτά σχηματίζουν πλαστικές αρθρώσεις σε δοκούς ή σε συνδέσεις αυτών. Τα πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα παραλαμβάνουν δυνάμεις και καταπονούνται αξονικά. Στους κόμβους των πλαισίων χωρίς εκκεντρότητα οι ροπές είναι μηδενικές λόγω του σχηματισμού δικτυώματος των κόμβων.

Στην παρούσα μελέτη δίνονται τα χαρακτηριστικά των μεταλλικών πλαισίων που φαίνονται στον Πίνακα 2.7 τα οποία έχουν μελετηθεί σύμφωνα με τα American Wide Flange Beams (ASTMA6), όπου W είναι οι αντίστοιχες διατομές IPE βάση των Ευρωπαϊκών προτύπων (Τσουμάνη, 2023).

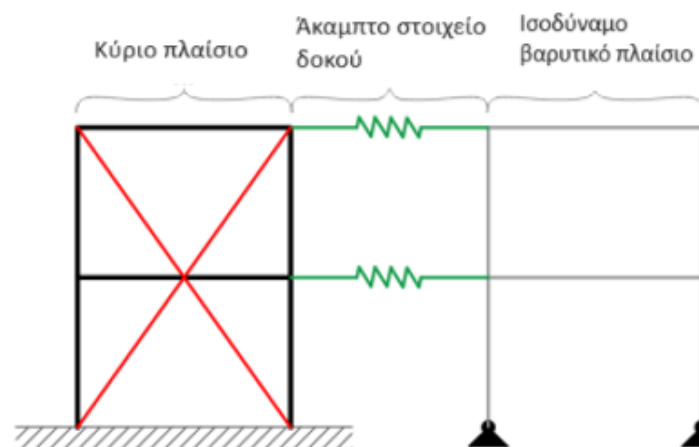
Πίνακας 2.7: Μεταλλικές διατομές δοκών και υποστυλωμάτων πλαισίου (Τσουμάνη, 2023)..

Όροφος	Ύψος (m)	Διατομή Στύλου [ύψος (h) * πλάτος (w)]	Διατομή Δοκού [ύψος (h) * πλάτος (w)]
1	4.6	W24*131	W27*102
2	3.7	W24*131	W27*102

Η θεμελίωση προσομοιώθηκε για τις δύο περιπτώσεις, σε πακτωμένη βάση και σε μη γραμμικά ελατήρια. Αποτελείται από μεμονωμένα πέδιλα χωρίς συνδετήριες δοκούς με ποιότητα σκυροδέματος κατηγορίας C30/37.



Σχήμα 2.19: Προσομοίωση μεταλλικού πλαισίου ροπών, MRF



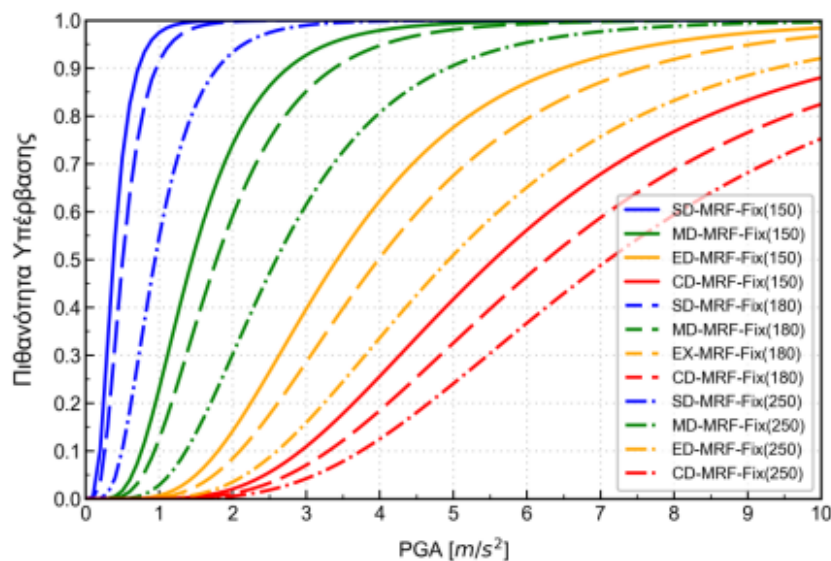
Σχήμα 2.20: Προσομοίωση μεταλλικού πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα, CBF

Χρησιμοποιήθηκαν αργιλικά εδάφη, τα οποία έχουν τις αντίστοιχες ταχύτητες κυμάτων V_s για βάθος έως 30m.

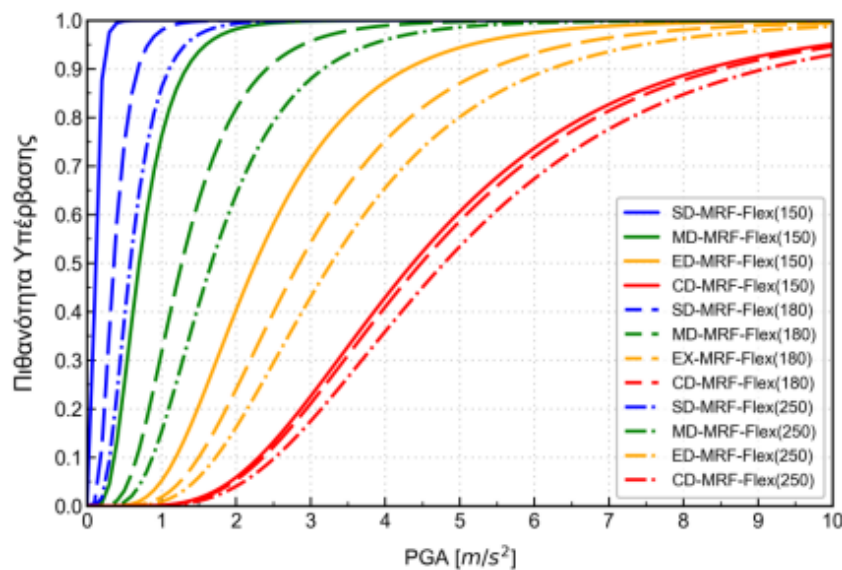
Για τα παραπάνω δύο ήδη μεταλλικών πλαισίων δημιουργήθηκαν καμπύλες τρωτότητας σε όρους πιθανότητας και σε όρους απωλειών (Τσουμάνη, 2023).

2.1.4.2 Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, σε όρους πιθανότητας (Fragility curves)

Μελετώνται καμπύλες τρωτότητας σε συνθήκες πάκτωσης και σε ενδόσιμη θεμελίωση, δηλαδή με μη γραμμικά ελατήρια. Στην περίπτωση της πάκτωσης μπορούν να δημιουργηθούν περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας και ενδεχομένως την πρόκληση μεγαλύτερων μετακινήσεων. Εδάφη που έχουν μικρή δυστημσία (δηλαδή στην πλευρική παραμόρφωση), δέχονται μεγάλα πλάτη ταλάντωσης και έχουν μεγάλες τιμές μετακίνησης.



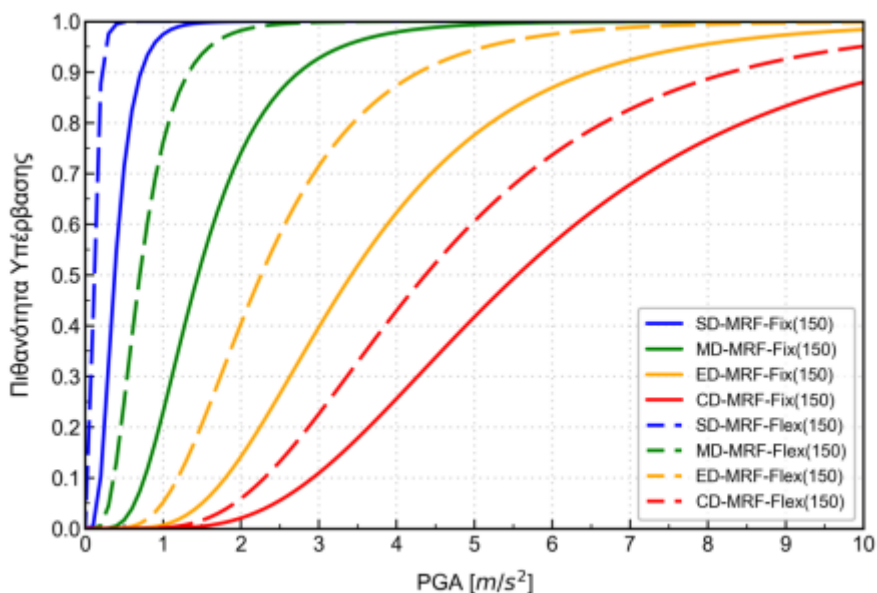
Σχήμα 2.21: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, με ταχύτητες διατμητικών κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).



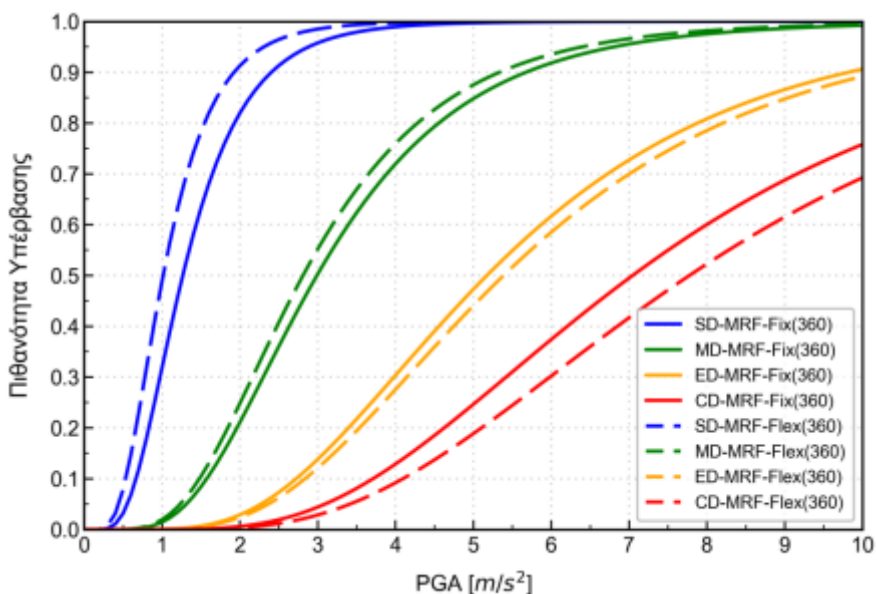
Σχήμα 2.22: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, με ταχύτητες διατμητικών κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).

Στα Σχήματα 2.21 – 2.22 παράχθηκαν καμπύλες τρωτότητας για αργλικά προφίλ με διαφορετικές ταχύτητες διατμητικών κυμάτων και για τις τέσσερις στάθμες βλάβης. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 2.21 το μεταλλικό πλαίσιο ροπής είναι σε συνθήκες πακτωμένης θεμελίωσης, όπου υπάρχει αύξηση της τρωτότητας με την μείωση της ταχύτητας κυμάτων. Επίσης, στο Σχήμα 2.22, όπου εξετάστηκε η θεμελίωση με μη γραμμικά ελατήρια (ενδόσιμη θεμελίωση), υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης για όλες τις ταχύτητες, σε κάποιο επίπεδο βλάβης.

Παρακάτω παρουσιάζονται καμπύλες τρωτότητας για ταχύτητες διατμητικών κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$ και $V_s=360\text{m/s}$ σε δύο διαφορετικές συνθήκες πακτωμένης θεμελίωσης και σε ενδόσιμη θεμελίωση.



Σχήμα 2.23: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=150\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).



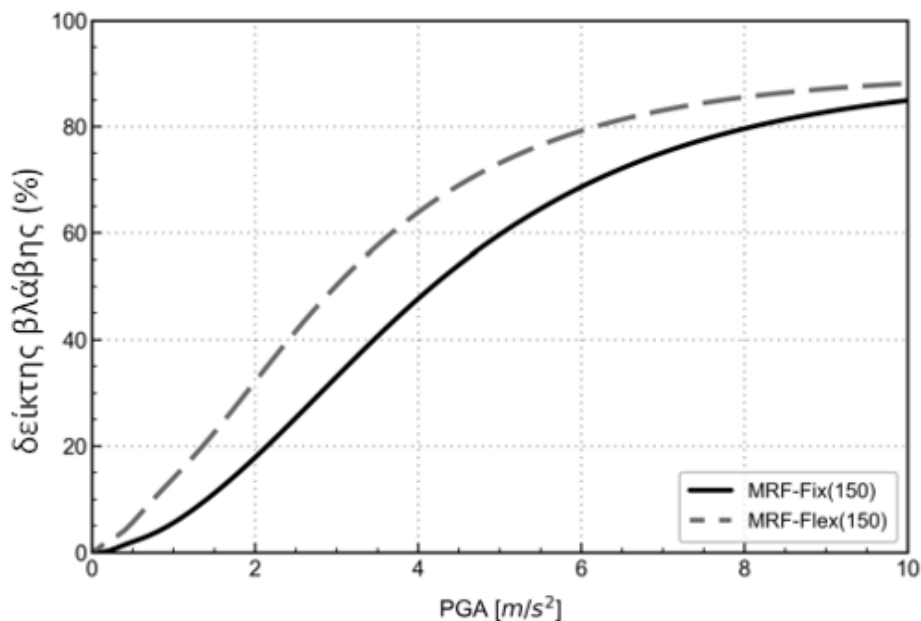
Σχήμα 2.24: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου MRF, ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=360\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).

Οι καμπύλες τρωτότητας για αργλικό εδαφικό προφίλ με συνθήκες πάκτωσης και μη γραμμικών ελατηρίων με ταχύτητες κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$ και $V_s=360\text{m/s}$ παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.23 και Σχήμα 2.24 αντίστοιχα. Στο μαλακό έδαφος ($V_s=150\text{m/s}$) φαίνεται μεγαλύτερη η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης σε σχέση με το δύσκαμπτο έδαφος ($V_s=360\text{m/s}$). Τα μαλακά εδάφη δίνουν μεγάλα πλάτη ταλάντωσης καθιστώντας αναπόφευκτη την εμφάνιση βλαβών.

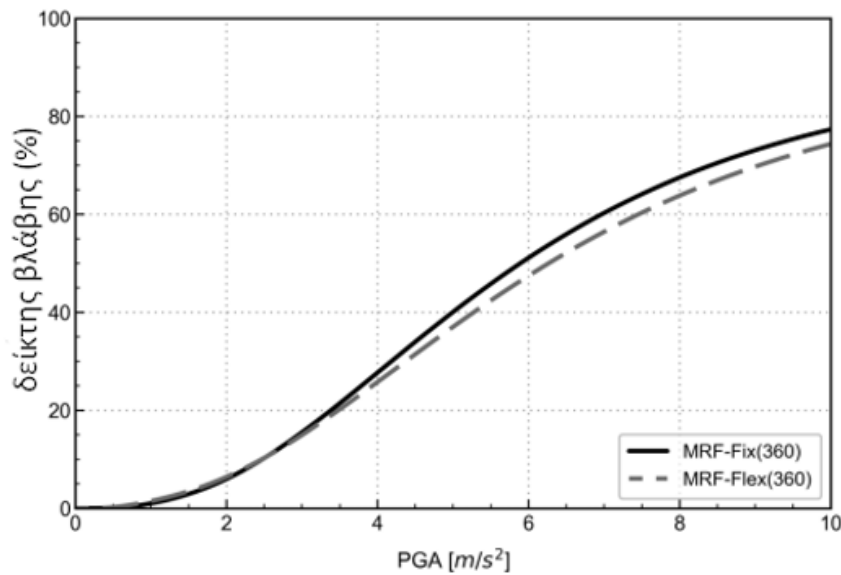
Συνεπώς το μεταλλικό πλαίσιο εμφανίζει περισσότερες πιθανότητες βλάβης σε μαλακά εδάφη, δηλαδή σε εδάφη με μικρή ταχύτητα κύματος και στα εδάφη με συνθήκες ενδόσιμης θεμελίωσης (μη γραμμικών ελατηρίων) (Τσουμάνη, 2023).

2.1.4.3 Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου Ροπής MRF σε όρους απωλειών (Vulnerability curves)

Για το μεταλλικό πλαίσιο υπολογίζονται καμπύλες τρωτότητας σε όρους δείκτη βλάβης- απωλειών, ώστε να γίνει καλύτερη παρατήρηση της συμπεριφοράς του κτιρίου. Δίνονται καμπύλες τρωτότητας για ταχύτητες διατμητικών κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$ και $V_s=360\text{m/s}$ και στις δύο συνθήκες θεμελίωσης (Τσουμάνη, 2023).



Σχήμα 2.25: Καμπύλες τρωτότητας μεταλλικού πλαισίου MRF σε όρους απωλειών, με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=150\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).



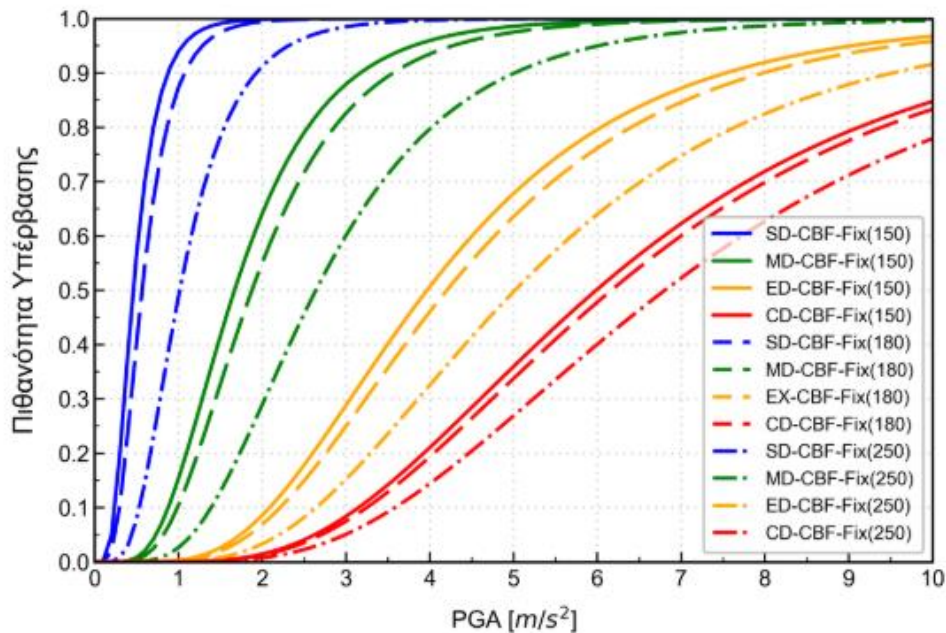
Σχήμα 2.26: Καμπύλες τρωτότητας μεταλλικού πλαισίου MRF σε όρους απωλειών, με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=360\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).

Στα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 2.25 - Σχήμα 2.26) συγκρίνονται οι καμπύλες τρωτότητας του μεταλλικού πλαισίου MRF σε όρους απωλειών, για εδάφη με ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$ και $V_s=360\text{m/s}$. Η ταχύτητα εδάφους $V_s=150\text{m/s}$ παράγει αυξημένες απώλειες σε σχέση με το αργιλικό έδαφος με ταχύτητα κύματος $V_s=360\text{m/s}$.

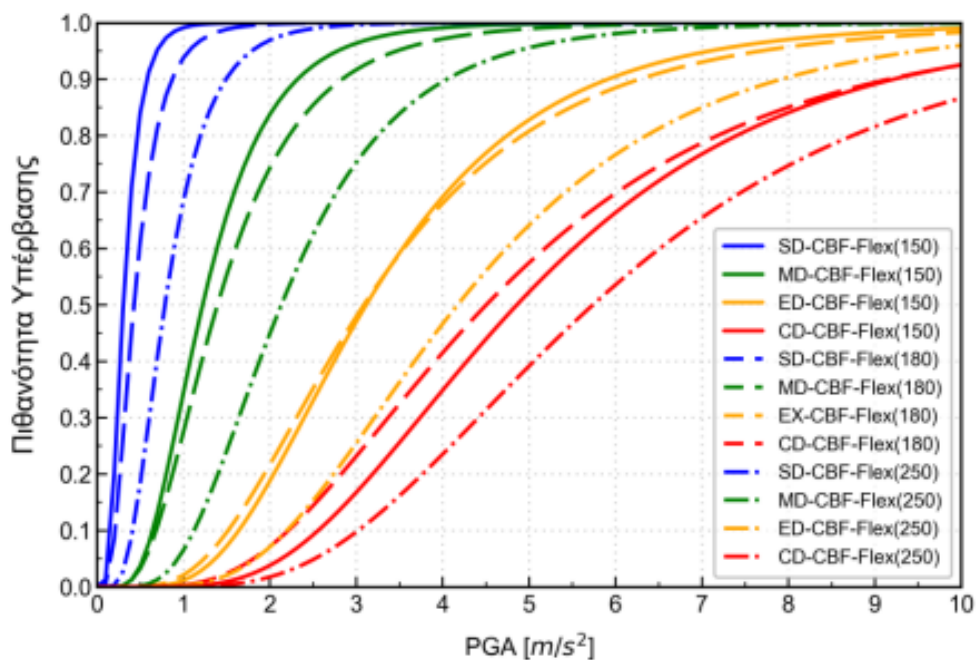
Με την σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις καμπύλες τρωτότητας του μεταλλικού πλαισίου MRF σε όρους πιθανότητας και όρους απωλειών, συμπεραίνεται ότι στα μαλακά εδάφη (με μικρότερες ταχύτητες κυμάτων δυσκαμψίας) αναπτύσσονται μεγαλύτερες απώλειες – βλάβες και ιδιαίτερα στην περίπτωση θεμελίωσης με μη γραμμικά ελατήρια (Τσουμάνη, 2023).

2.1.4.4 Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με Συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF, σε όρους πιθανότητας (Fragility curves)

Οι παρακάτω καμπύλες τρωτότητας πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα μελετώνται σε συνθήκες πάκτωσης και σε συνθήκες ενδόσιμης θεμελίωσης, όπως και στο πλαίσιο MRF. Αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.27 για συνθήκες πακτωμένης θεμελίωσης και στο Σχήμα 2.28 για συνθήκες ενδόσιμης θεμελίωσης, για τις ταχύτητες κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$,



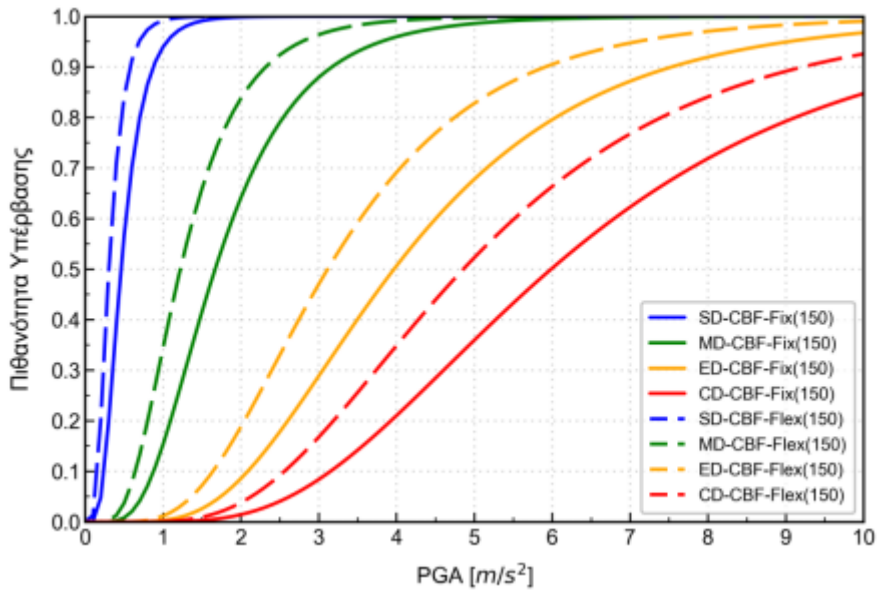
Σχήμα 2.27: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε πακτωμένη θεμελίωση, με ταχύτητες κυμάτων δυσκαμψίας $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).



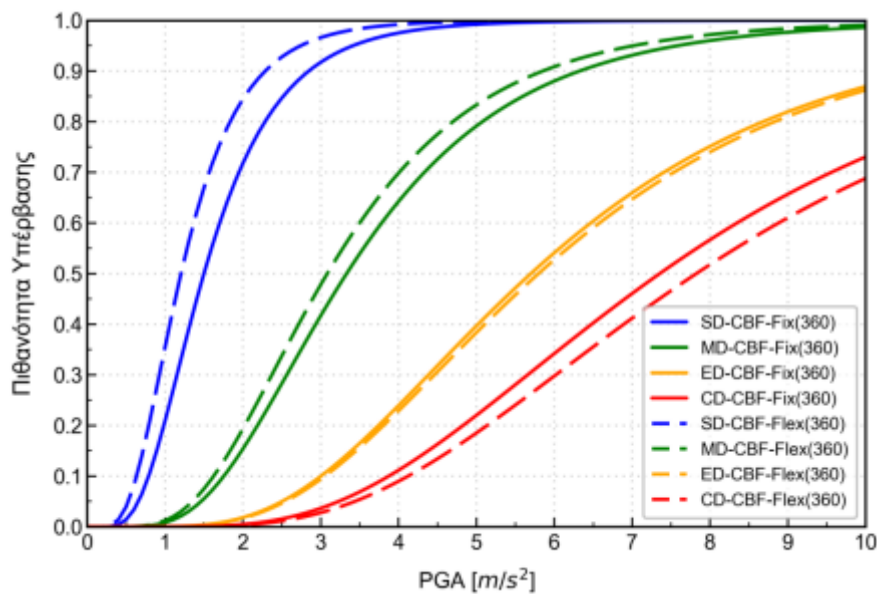
Σχήμα 2.28: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε ενδόσιμη θεμελίωση, με ταχύτητες κυμάτων δυσκαμψίας $V_s=150\text{m/s}$, $V_s=180\text{m/s}$ και $V_s=250\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).

Στο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF για συνθήκες πάκτωσης στο Σχήμα 2.27, η καμπύλη τρωτότητας αυξάνεται στην περίπτωση της μειωμένης εδαφικής δυσκαμψίας, δηλαδή για ταχύτητα $V_s=150\text{m/s}$. Επίσης στις καμπύλες τρωτότητας της ενδόσιμης θεμελίωσης (μη γραμμικών ελατηρίων) στο Σχήμα 2.28, παρατηρούνται ακόμη μεγαλύτερες πιθανότητες να ξεπεραστεί η στάθμη βλάβης για όλες τις ταχύτητες κυμάτων δυσκαμψίας (Τσουμάνη, 2023).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται καμπύλες τρωτότητας για ταχύτητες διατμητικών κυμάτων $V_s=150\text{m/s}$ και $V_s=360\text{m/s}$ και για συνθήκες πακτωμένης θεμελίωσης και ενδόσιμης θεμελίωσης.



Σχήμα 2.29: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF, για αργιλικό εδαφικό προφίλ με ταχύτητα κύματος δυσκαμψίας $V_s=150\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).

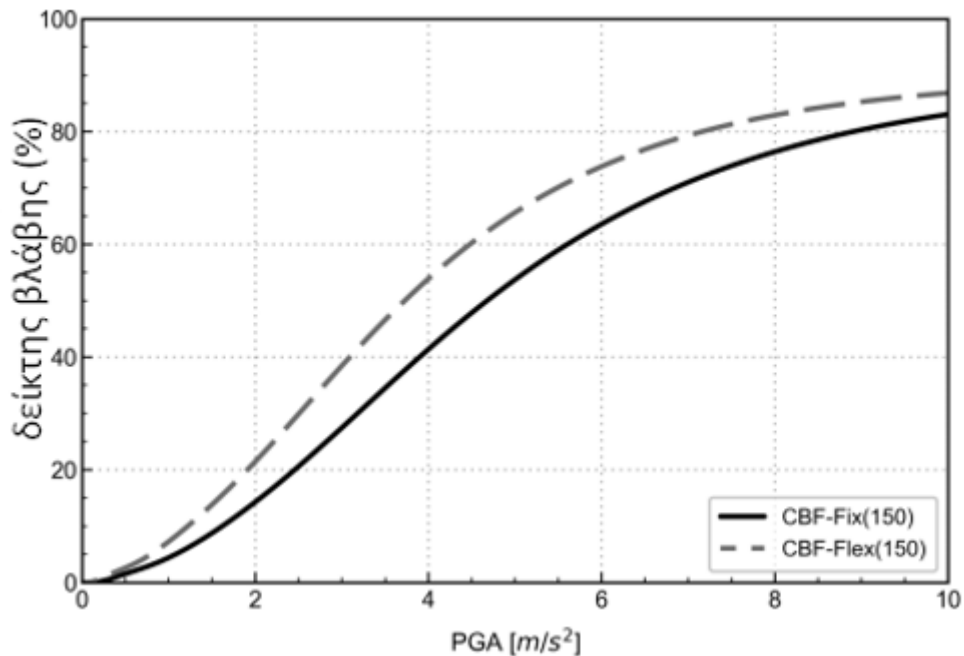


Σχήμα 2.30: Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF, με ταχύτητα κύματος δυσκαμψίας $V_s=360\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).

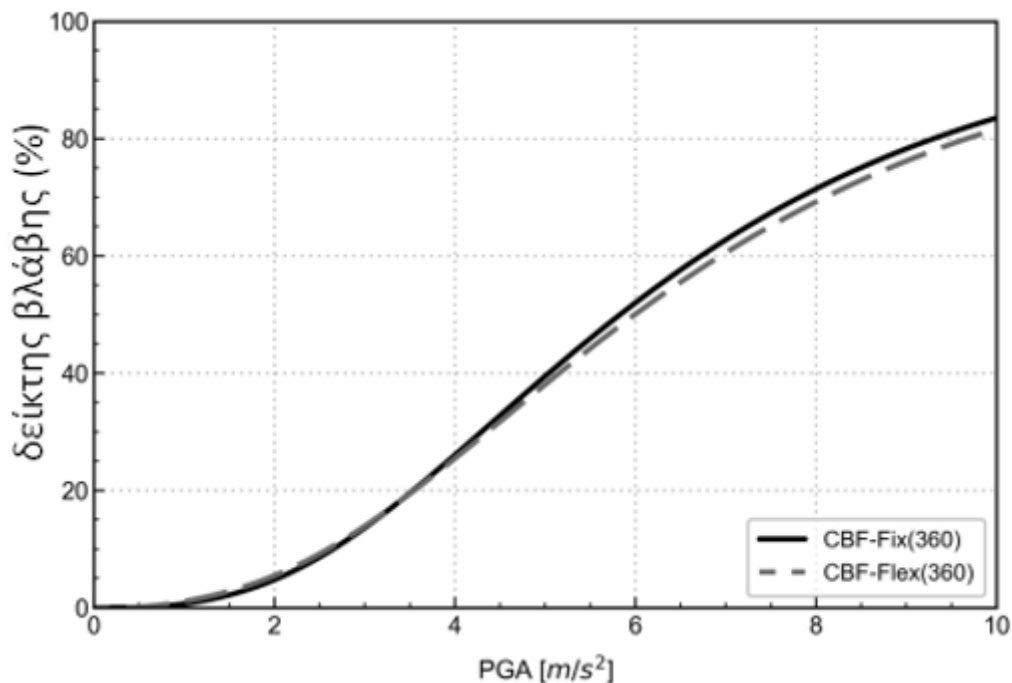
Στις καμπύλες τρωτότητας για συνθήκες πάκτωσης θεμελίωσης και ενδόσιμης, με ταχύτητες $V_s=150\text{m/s}$ και $V_s=360\text{m/s}$ δίνονται στα Σχήμα 2.29 - Σχήμα 2.30 αντίστοιχα. Παρατηρούνται μεγαλύτερες πιθανότητες να παρουσιαστεί βλάβη στην περίπτωση με τη μικρότερη ταχύτητα δυσκαμψίας, όπου το έδαφος είναι μαλακότερο. Επίσης η κατασκευή εμφανίζει μεγαλύτερη τρωτότητα στα εδάφη με ενδόσιμη θεμελίωση.

2.1.4.5 Καμπύλες Τρωτότητας Μεταλλικού Πλαισίου με Συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε όρους απωλειών (Vulnerability curves)

Στα Σχήμα 2.31 - Σχήμα 2.32 υπολογίζονται οι καμπύλες τρωτότητας για το μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους σε όρους δείκτη απωλειών – βλάβης.



Σχήμα 2.31: Καμπύλες τρωτότητας μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε όρους απωλειών, με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=150\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).



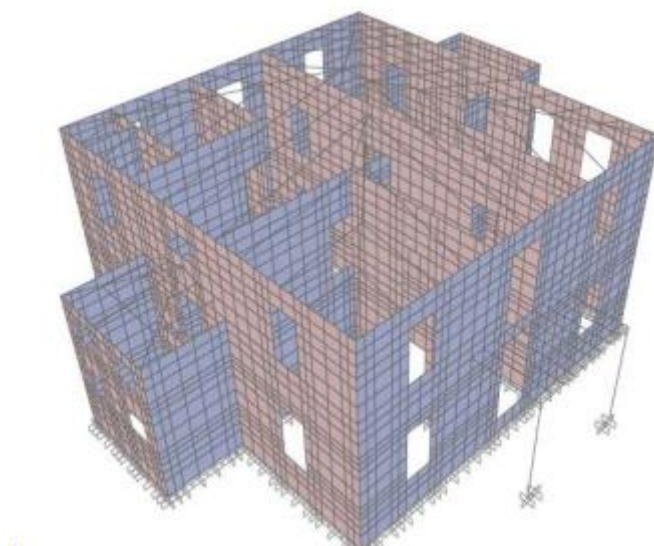
Σχήμα 2.32: : Καμπύλες τρωτότητας μεταλλικού Πλαισίου με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα CBF σε όρους απωλειών, με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=360\text{m/s}$ (Τσουμάνη, 2023).

Παρατηρείται ότι και στις καμπύλες τρωτότητας σε όρους απωλειών, μεγαλύτερη τρωτότητα έχει το έδαφος με την μικρότερη ταχύτητα διατμητικού κύματος, δηλαδή μαλακού εδάφους. Ενώ στο έδαφος με μεγαλύτερη ταχύτητα διατμητικού κύματος, άρα πιο δύσκαμπτο έδαφος οι απώλειες είναι μικρότερες (Τσουμάνη, 2023).

2.1.5 Καμπύλες Τρωτότητας Κτιρίων από Φέρουσα Τοιχοποιία

Όλες οι κατασκευές μέχρι τον 19^ο αιώνα υλοποιούνταν από φέρουσα τοιχοποιία, η οποία αποτελούσε βασικό δομικό υλικό. Βασικοί τύποι τοιχοποιιών είναι οι τοιχοποιίες από φυσικούς λίθους, από τεχνητά λιθοσώματα (πλινθοδομές) και ξυλόπηκτες κατασκευές (Πολυχρονίου, 2011).

Ερευνητές εξετάζουν την περίπτωση ενός διατηρητέου νεοκλασικού κτιρίου κανονικό σε κάτοψη αποτελούμενο από ημί-υπόγειο, ισόγειο και όροφο με ξύλινα δάπεδα και στέγη με επένδυση από κεραμίδι (Πολυχρονίου, 2011). Η τοιχοποιία είναι από αργολιθοδομή από τοπικό ασβεστόλιθο και χαμηλής ποιότητας κονίαμα. Το κτίριο προσομοιώθηκε μέσω του προγράμματος SAP 2000 (Σχήμα 2.33).



Σχήμα 2.33: Προσομοίωμα κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία

Χρησιμοποιήθηκαν οι σεισμικές εντάσεις με εδαφική επιτάχυνση PGA 0,16g, 0,32g, 0,40g και 0,40g. Τα αποτελέσματα εφελκυστικής αντοχής f_{wt} εισάχθηκαν στο πρόγραμμα «Failure» για τον προσδιορισμό των δεικτών βλάβης. Στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζεται το ποσοστό βλάβης για κάθε περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης, με εννέα (9) κονιάματα δόμησης (K50-K450).

Πίνακας 2.8: Ποσοστό βλάβης κτιρίου για κονιάματα συναρτήσει εδαφικών επιταχύνσεων (Πολυχρονίου, 2011).

f_{wt} /PGA	0.16g	0.24g	0.36g	0.40g
K50	62.84	74.12	84.89	88.47
K100	47.02	61.01	73.39	79.28
K150	37.64	48.81	62.74	71.02
K200	27.25	39.83	52.60	61.85
K250	20.12	31.83	44.47	54.44
K300	16.01	26.59	38.19	47.25
K350	12.01	22.31	33.17	41.46
K400	9.05	18.43	28.72	36.32
K450	6.39	15.96	24.91	31.68

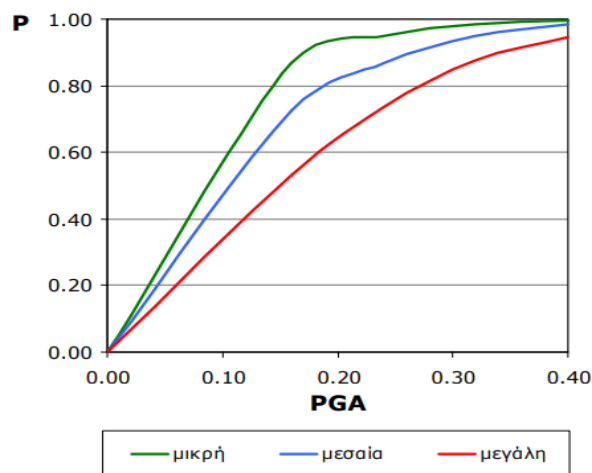
Γίνεται παραγωγή καμπυλών τρωτότητας βάση της κανονικής και της λογαριθμικής κανονικής κατανομής. Χρησιμοποιούνται τα επίπεδα βλάβης από τον Πίνακα 2.9 (Πολυχρονίου, 2011).

Πίνακας 2.9: Επίπεδα βλάβης για την εξαγωγή καμπυλών τρωτότητας (Πολυχρονίου, 2011).

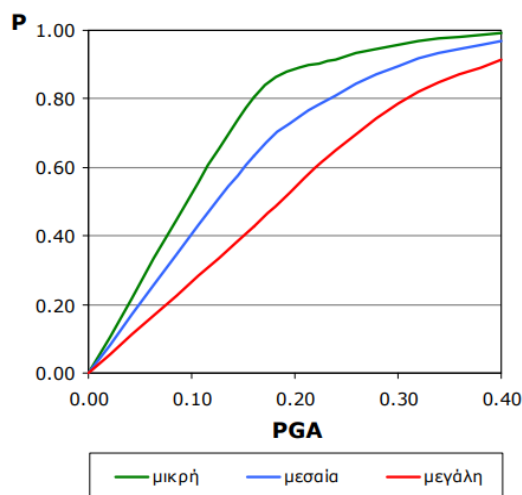
Επίπεδα βλάβης	Καμία βλάβη (%)	Μικρή βλάβη (%)	Μεσαία βλάβη %	Μεγάλη βλάβη %
Τύπου α	0-5	5-15	15-25	>25
Τύπου β	0-10	10-20	20-30	>30
Τύπου γ	0-15	15-35	35-45	>45

A) Υπολογισμοί καμπυλών τρωτότητας με βάση την Κανονική Κατανομή

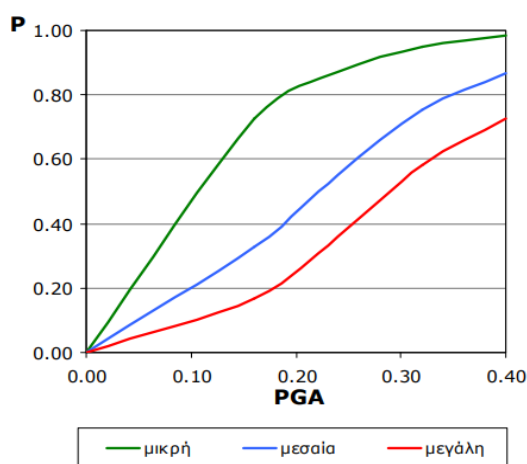
Στα Σχήματα 2.34 – 2.36 δίνονται οι καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της πιθανότητας υπέρβασης ενός επιπέδου βλάβης με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση για τα επίπεδα βλάβης α-γ αντίστοιχα.



Σχήμα 2.34: Καμπύλες τρωτότητας κανονικής κατανομής για βλάβες τύπου α (Πολυχρονίου, 2011).



Σχήμα 2.35: Καμπύλες τρωτότητας κανονικής κατανομής για βλάβες τύπου β (Πολυχρονίου, 2011).

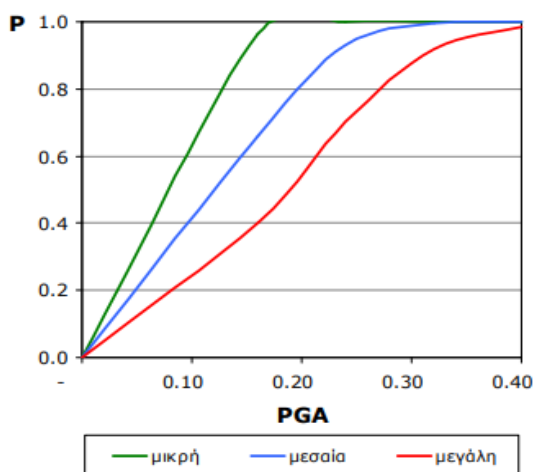


Σχήμα 2.36: Καμπύλες τρωτότητας κανονικής κατανομής για βλάβες τύπου γ (Πολυχρονίου, 2011).

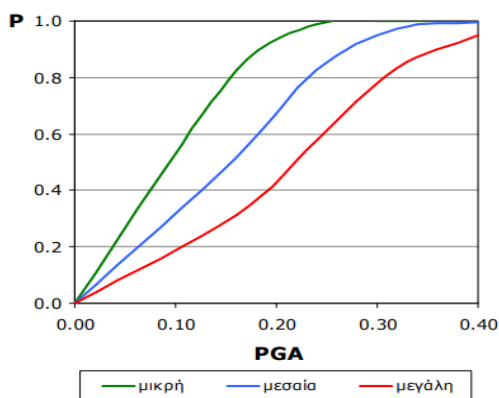
Από τα παραπάνω διαγράμματα καμπυλών τρωτότητας προκύπτει πως η μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης μίας στάθμης βλάβης είναι στην περίπτωση του τύπου α. Η εμφάνιση μικρών βλαβών είναι μεγαλύτερη από το 80% και στα τρία διαγράμματα.

Β) Υπολογισμοί καμπυλών τρωτότητας με βάση την Λογαριθμική Κανονική Κατανομή

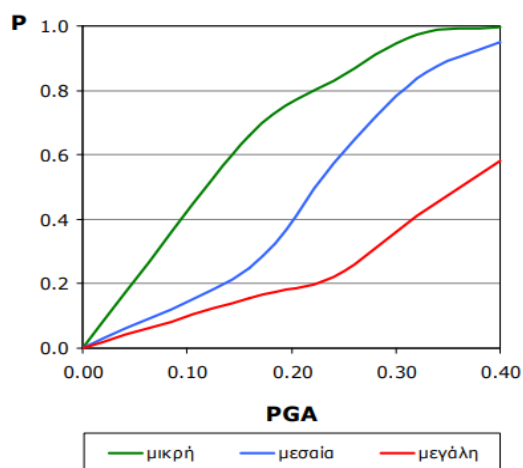
Στα Σχήματα 2.37 – 2.39 δίνονται οι καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της πιθανότητας υπέρβασης ενός επιπέδου βλάβης με την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση για τους βαθμούς βλάβης α, β και γ αντίστοιχα.



Σχήμα 2.37: Καμπύλες τρωτότητας λογαριθμικής κατανομής για βλάβες τύπου α (Πολυχρονίου, 2011).



Σχήμα 2.38: Καμπύλες τρωτότητας λογαριθμικής κατανομής για βλάβες τύπου β (Πολυχρονίου, 2011).



Σχήμα 2.39: Καμπύλες τρωτότητας λογαριθμικής κατανομής για βλάβες τύπου γ (Πολυχρονίου, 2011).

Επίσης, από τα παραπάνω διαγράμματα καμπυλών τρωτότητας με βάση την λογαριθμική κανονική κατανομή προκύπτει πως η μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης μίας στάθμης βλάβης είναι στην περίπτωση του τύπου α. Στις καμπύλες τρωτότητας για στάθμες βλάβης τύπου α και β η πιθανότητα υπέρβασης φτάνει έως και το 100%

2.2 Καμπύλες Τρωτότητας Συγκοινωνιακών Δικτύων

Στον ελληνικό χώρο έχει αγνοηθεί η ανάγκη για την αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας και διακινδύνευσης των δικτύων κοινής ωφέλειας και υποδομών ενός αστικού περιβάλλοντος. Η διακοπή της λειτουργίας τους έχει σημαντικές συνέπειες, ιδιαίτερα στην περίπτωση ενός ισχυρού ή καταστροφικού σεισμού. Τα δίκτυα αυτά έχουν σημαντικό ρόλο και η επαναφορά της περιοχής στην αρχική της κατάσταση πρέπει να είναι άμεση (Αργυρούδη, 2010).

2.2.1 Καμπύλες Τρωτότητας σε Γέφυρες

Με τη εξέταση της σεισμικής τρωτότητας σε γέφυρες αποκτάται γνώση της πιθανότητας εμφάνισης και εκτίμησης των βλαβών στο οδικό δίκτυο, μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Έτσι σε μία γέφυρα που πρέπει να παραμείνει σε λειτουργία σε περίπτωση σεισμού θα πρέπει να διασφαλιστούν συνθήκες διέλευσης σε ασθενοφόρα και πυροσβεστικά οχήματα (Μπάρλα , 2004).

Οι γέφυρες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον μηχανισμό απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας. Σύμφωνα με το σεισμό σχεδιασμού, ταξινομούνται σε γέφυρες με ανελαστικά (από το σεισμό σχεδιασμού) βάθρα και σε γέφυρες με εφέδρανα (με ή χωρίς σεισμικούς συνδέσμους). Στις γέφυρες με ανελαστικά βάθρα ο καθορισμός των σταθμών βλάβης γίνεται με βάση την καμπύλη αντίστασης. Εφαρμόζονται πέντε (5) στάθμες βλάβης: μηδενικές βλάβες (ΣΒ0), μικρές βλάβες (ΣΒ1), μέσες βλάβες (ΣΒ2), εκτενείς βλάβες (ΣΒ3) και κατάρρευση (ΣΒ4). Για τον καθορισμό των σταθμών χρησιμοποιείται ο δείκτης πλαστιμότητας μετακινήσεων δ/δ_y , όπου δ_y είναι η μετακίνηση στη φάση της διαρροής του υλικού κατασκευής της γέφυρας.

Οι τιμές του παρακάτω πίνακα προέκυψαν από τους σύγχρονους κανονισμούς με πειραματικά δεδομένα για σεισμικά φορτία. Ο μέσος όρος των διατμητικών παραμορφώσεων των εφεδράνων υπολογίζεται με τη σχέση: $\gamma_g = \frac{\sum \gamma_{bi}}{N}$

Όπου:

γ_g = η διατμητική παραμόρφωση,

N= ο συνολικός αριθμός των εφεδράνων της γέφυρας,

και γ_{bi} = η διατμητική παραμόρφωση του μεμονωμένου εφεδράνου i.

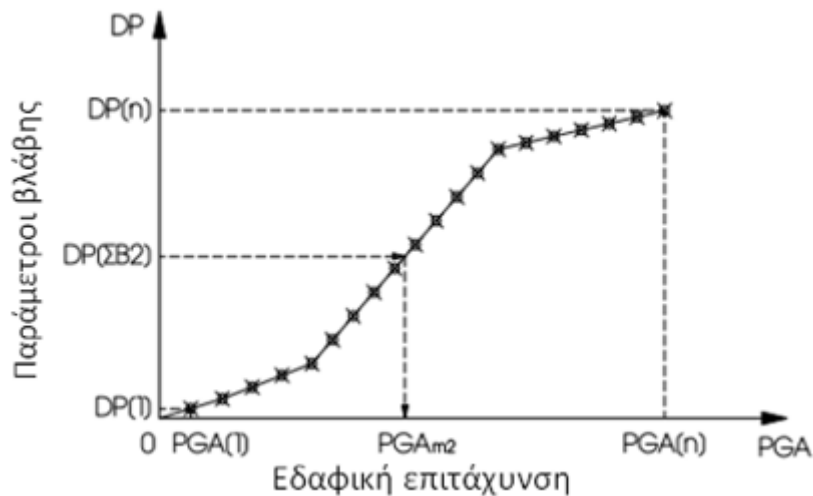
Πίνακας 2.10: Καθορισμός σταθμών βλάβης για γέφυρες με ανελαστικά βάθρα (Μπάρλα , 2004)

α/α	Στάθμη Βλάβης	Απαιτούμενες επισκευές	Τιμές κατωφλιού δ/δ_y
ΣΒ0	Μηδενικές βλάβες	Καμία	≤ 0.7
ΣΒ1	Μικρές βλάβες	Μικρές επιδιορθώσεις	>0.7
ΣΒ2	Μέσες βλάβες	Επισκευή στοιχείων	>1.5
ΣΒ3	Εκτενείς βλάβες	Ανακατασκευή τμημάτων	>3.0
ΣΒ4	Κατάρρευση	Ανακατασκευή γέφυρας	$>$ μη υπολογ.

Πίνακας 2.11: Καθορισμός σταθμών βλάβης για γέφυρες με εφέδρανα (Μπάρα , 2004)

α/α	Στάθμες βλάβης	Όρια σταθμών βλάβης	Τιμές κατοφλιού γ_{bi}
ΣΒ0	Μηδενικές βλάβες	$0 \leq \gamma < \gamma_y = 0,2$	$< \gamma_y = 0,2$
ΣΒ1	Μικρές βλάβες	$\gamma_y = 0,2 \leq \gamma < 1,5$	$\gamma_y = 0,2$
ΣΒ2	Μέσες βλάβες	$1,5 \leq g < 2,0$	1,5
ΣΒ3	Εκτενείς βλάβες	$2,0 \leq g < 5,0$	2,0
ΣΒ4	Κατάρρευση	$\gamma > 5,0$	5,0

Ο καθορισμός των σταθμών βλάβης γίνεται με χρήση παραμέτρων βλάβης (damage parameter, DP) σύμφωνα με τους Πίνακας 2.10 Πίνακας 2.11. Στην περίπτωση των γεφυρών με ανελαστικά βάρθρα οι παράμετροι βλάβης είναι ο λόγος δ / δ_y ενώ σε γέφυρες με εφέδρανα είναι η μέση διατμητική παραμόρφωση γ_g . Με την χρήση των σταθμών βλάβης προκύπτει το διάγραμμα εξέλιξης της σεισμικής βλάβης σύμφωνα με το Σχήμα 2.40.



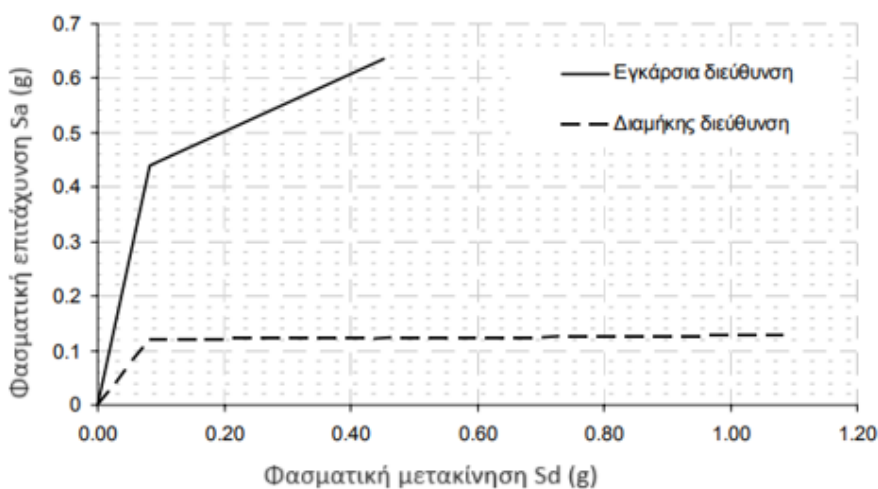
Σχήμα 2.40: Διάγραμμα εξέλιξης της σεισμικής βλάβης

Παρακάτω παρουσιάζονται υφιστάμενες γέφυρες με ανελαστικά βάρθρα και με εφέδρανα.

2.2.1.1 Γέφυρα της Κρυσταλλοπηγής

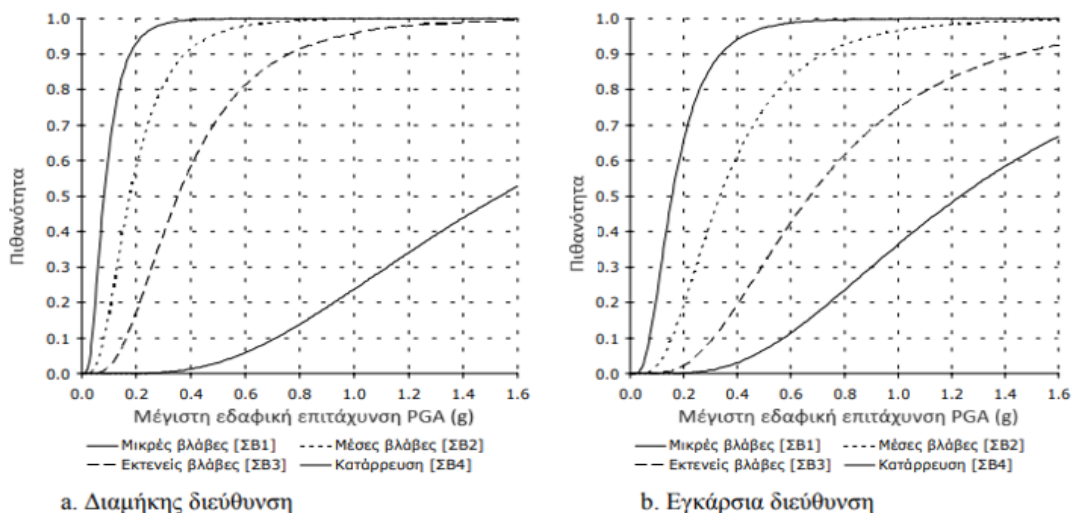
Η χαραδρογέφυρα της Κρυσταλλοπηγής κατασκευάστηκε στη βορειοδυτική Ελλάδα με δώδεκα ανοίγματα και συνολικό μήκος 638 m. Η διατομή του καταστρώματος πλάτος 13 m και συνολικό ύψος 2,80 m το οποίο στηρίζεται σε 11μεσόβαθρα. Η διατομή των μεσόβαθρων είναι κοίλη ορθογωνική. Η σύνδεση του καταστρώματος γίνεται με διαφορετικό τρόπο κατά μήκος του φορέα. Η σύνδεση τους με το κατάστρωμα γίνεται μέσω εφεδράνων, επιτρέποντας την μετακίνηση κατά τη διαμήκη διεύθυνση του φορέα και δεσμεύοντας την κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Τα βάθρα είναι ανελαστικά. Η θεμελίωση των βάθρων στο έδαφος γίνεται με ομάδες πασσάλων που έχουν μελετηθεί με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους (Κάππος, κ.α., 2006).

Παρακάτω υπολογίζονται οι καμπύλες αντίστασης κατά τις δύο διευθύνσεις μετά από ανάλυση με φορτία που αντιστοιχούν στη θεμελιώδη ιδιομορφή (Σχήμα 2.41).



Σχήμα 2.41: Καμπύλες αντίστασης ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (Κάππος, κ.α., 2006)

Συγκεκριμένα, στο παραπάνω Σχήμα 2.41 χρησιμοποιήθηκε το ελαστικό φάσμα του ΕΑΚ2000 για έδαφος κατηγορίας Β. Η τιμή της λογαριθμικής τυπικής απόκλισης β_{tot} τέθηκε ίση με 0,6.



Σχήμα 2.42: Καμπύλες Τρωτότητας για την γέφυρα της Κρυσταλλοπηγής (Κάππος, κ.α., 2006).

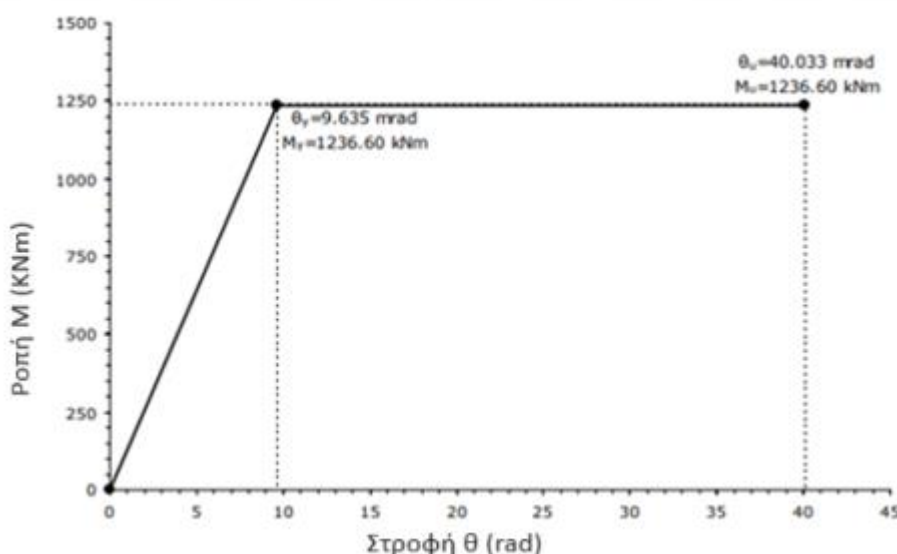
Στο Σχήμα 2.42 παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας που προέκυψαν για τη γέφυρα της Κρυσταλλοπηγής κατά τις δύο διευθύνσεις και διαπιστώνεται ότι η απόσταση των καμπυλών τρωτότητας μεταξύ της τελευταίας στάθμης βλάβης (ΣΒ4) και των υπόλοιπων τριών (ΣΒ1, ΣΒ2, ΣΒ3) είναι μεγαλύτερη στη διαμήκη διεύθυνση από την αντίστοιχη εγκάρσια. Παρατηρείται διαφοροποίηση της πλαστιμότητας μεταξύ των δύο διευθύνσεων. Η πιθανότητα κατάρρευσης της γέφυρας είναι σχεδόν ίδια και για τις δύο διευθύνσεις. Στην διαμήκη διεύθυνση προκύπτει η πιθανότητα να αναπτυχθούν μικρές, μέσες ή εκτενείς βλάβες οι οποίες θα είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της εγκάρσιας διεύθυνσης (Κάππος, κ.α., 2006).

2.2.1.2 Γέφυρα του ποταμού Λίσσου

Ανήκει στην κατηγορία γεφυρών με εφέδρανα και ελαστικά βάθρα. Πρόκειται για μία γέφυρα που κατασκευάστηκε από την ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟ Α.Ε. στη βορειοανατολική Ελλάδα, με έντεκα ανοίγματα και συνολικό μήκος 430m. Το κατάστρωμα είναι προεντεταμένο μονοκυψελικό κιβώτιο με συνολικό πλάτος 13m και στηρίζεται μέσω εφεδράνων σε 10 μεσόβαθρα με ύψος που κυμαίνεται από 4,5 έως 10,6m. Η διατομή των τοιχωματικών βάθρων είναι ορθογωνική και στην στέψη υπάρχουν σεισμικοί σύνδεσμοι με στόχο τον περιορισμό της εγκάρσιας μετακίνησης του καταστρώματος. Η θεμελίωση των βάθρων στο έδαφος γίνεται με ομάδες πασσάλων.

Είναι η πρώτη γέφυρα στην Ελλάδα που κατασκευάστηκε με την μέθοδο της προώθησης. Δημιουργήθηκε αριθμητικό προσομοίωμα με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων. Αντίθετα, η δυσκαμψία του καταστρώματος δόθηκε ίση με αυτή της αρηγμάτωτης διατομής και η δυσκαμψία των βάθρων υπολογίστηκε με τη ροπή στη διαρροή του οπλισμού. Τα βάθρα μπορεί να μην διαρρέουν, ωστόσο θα εμφανίσουν ρηγματώσεις (Κάππος, κ.α., 2006).

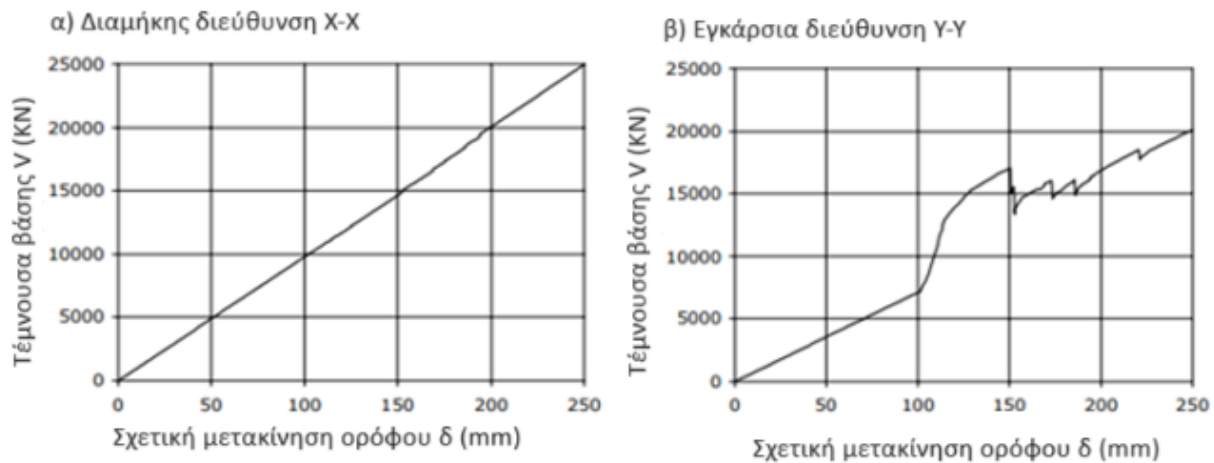
Για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των σεισμικών συνδέσμων που είναι τοποθετημένοι στα άκρα της κεφαλής των μεσόβαθρων, τοποθετήθηκαν σημειακές πλαστικές αρθρώσεις, για τις οποίες υπολογίστηκε διάγραμμα ρομών – στροφών (M-θ) του Σχήμα 2.43. Η ενεργός δυσκαμψία τους υπολογίστηκε, με βάση την τιμή της ροπής κατά τη διαρροή του οπλισμού.



Σχήμα 2.43: Διάγραμμα ρομών - στροφών (M-θ) των σεισμικών συνδέσμων

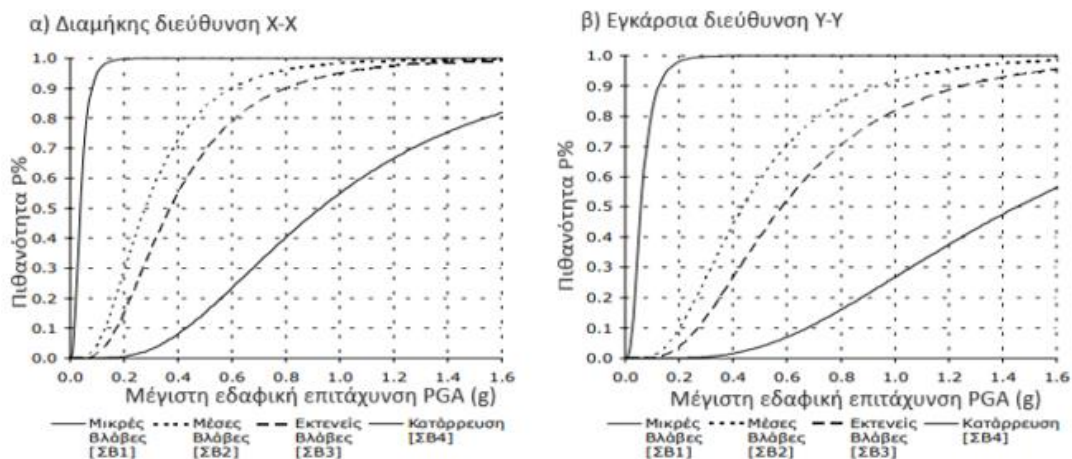
Για την προσομοίωση της πρόσκρουσης του καταστρώματος επί των σεισμικών συνδέσμων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διακένου (gap elements), με κενό ίσο με αυτό μεταξύ καταστρώματος και σεισμικών συνδέσμων. Τα στοιχεία απαιτείται να είναι δύσκαμπτα σε σχέση με τα συνδεόμενα στοιχεία (σεισμικοί σύνδεσμοι και κατάστρωμα) και να μην δημιουργούνται αστάθειες στον αλγόριθμο επίλυσης. Η τιμή της σταθεράς ελατηρίου (σε θλίψη) των στοιχείων ορίστηκε $K = 1350000 \text{ kN/m}$.

Έτσι με το αριθμητικό προσομοίωμα της γέφυρας δημιουργήθηκαν οι καμπύλες αντίστασης της γέφυρας που φαίνονται στο Σχήμα 2.44 και οι καμπύλες τρωτότητας στο Σχήμα 2.45.



Σχήμα 2.44: Καμπύλες αντίστασης γέφυρας ποταμού Λίσσου κατά την διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση (Κάππος, κ.α., 2006).

Αναλυτικότερα, ως φάσμα απαίτησης χρησιμοποιήθηκε το ελαστικό φάσμα του ΕΑΚ2003, για έδαφος κατηγορίας Γ. Η τιμή της συνολικής λογαριθμικής-κανονικής τυπικής απόκλισης β_{tot} τέθηκε ίση με 0.6 όπως και προηγουμένως. Οι μέσες τιμές κατωφλίου PGA_{mi} που προέκυψαν για τις στάθμες βλάβης ΣΒ1, ΣΒ2, ΣΒ3 και ΣΒ4 είναι αντίστοιχα 0.04g, 0.28g, 0.37g και 0.93g για τη διαμήκη διεύθυνση και 0.06g, 0.44g, 0.58g και 1.45g για την εγκάρσια διεύθυνση. Στο Σχήμα 2.45 παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας που προέκυψαν για την γέφυρα του ποταμού Λίσσου.



Σχήμα 2.45: Καμπύλες Τρωτότητας της γέφυρας του ποταμού Λίσσου (Κάππος, κ.α., 2006).

Διαπιστώνεται ότι η απόσταση των καμπυλών τρωτότητας για τις στάθμες ΣΒ2 και ΣΒ3 και στις δύο διευθύνσεις είναι μικρή. Η πιθανότητα η γέφυρα να υπερβεί οποιαδήποτε στάθμη βλάβης είναι μεγαλύτερη στην εγκάρσια διεύθυνση. Αυτό μπορεί να προβλεφθεί από τις τιμές κατωφλίου PGA_{mi} . Κατά τη διαμήκη διεύθυνση το κατάστρωμα μετακινείται ως στερεό σώμα με αποτέλεσμα όλα τα εφεδράνα να έχουν την ίδια μετακίνηση και η μέση διατμητική παραμόρφωση γ_{tot} να είναι περίπου ίση με την διατμητική παραμόρφωση του μεμονωμένου εφεδράνου γ_{bi} . Κατά την εγκάρσια διεύθυνση η παραμόρφωση του καταστρώματος ακολουθεί την ημιτονοειδή μορφή της θεμελιώδους ιδιόμορφης με αποτέλεσμα η παραμόρφωση να εμφανίζει σημαντική μεταβολή από το μέσον της γέφυρας προς τα ακρόβαθρα. Έτσι η συνολική παραμόρφωση γ_g προκύπτει μικρότερη από τη μέγιστη παραμόρφωση του μεμονωμένου εφεδράνου (Κάππος, κ.α., 2006).

2.2.2 Καμπύλες τρωτότητας σε σήραγγες

Οι σήραγγες αποτελούν κατασκευές μεγάλης σημασίας με ειδικές απαιτήσεις και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στη μελέτη σεισμικής τρωτότητας τους. Οι σεισμικές βλάβες που εμφανίζουν οφείλονται στην εδαφική ταλάντωση ή στην εδαφική αστοχία λόγω μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων.

Οι καμπύλες τρωτότητας συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης των μεταφορικών δικτύων. Βασίζονται δε σε εμπειρικά δεδομένα από πραγματικές σεισμικές βλάβες που έχουν παρατηρηθεί (Αργυρουδης, κ.α., 2008).

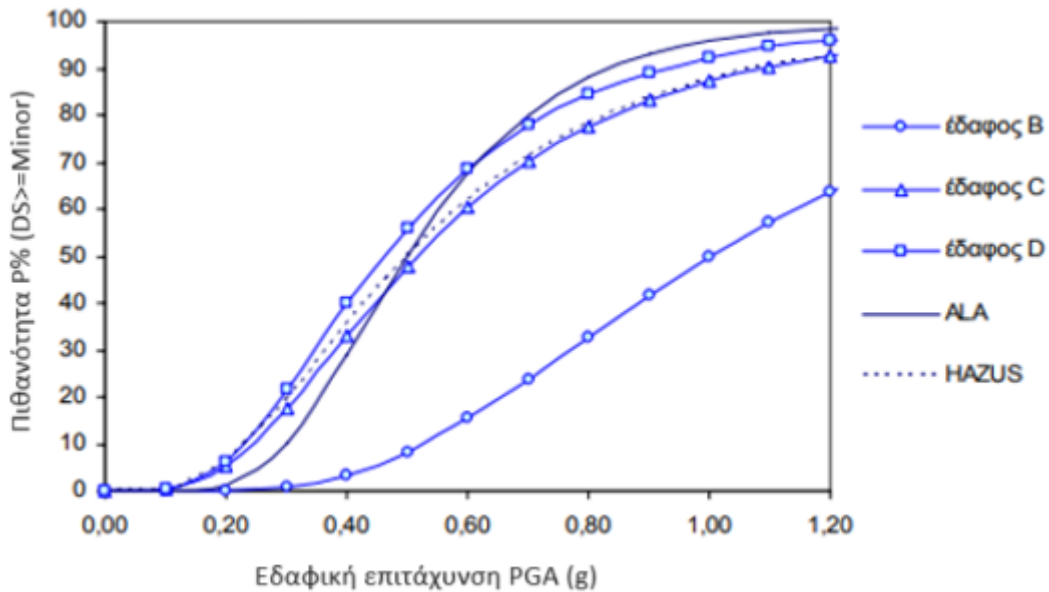
2.2.2.1 Καμπύλες τρωτότητας για σήραγγες μικρού βάθους

Παρακάτω παρουσιάζονται καμπύλες τρωτότητας για σήραγγες μικρού βάθους σε αλουβιακές αποθέσεις, μέσω μίας αναλυτικής μεθοδολογίας σε μία αριθμητική προσέγγιση, κατά την οποία η σήραγγα υποβάλλεται σε εγκάρσια σεισμική φόρτιση. Η απόκριση της κατασκευής υπολογίζεται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Χρησιμοποιούνται διαφορετικά τυπικά εδάφη και γεωμετρίες σηράγγων και εισάγονται διαφορετικές στάθμες σεισμικής έντασης. Με την χρήση διαφορετικών επιπέδων βλάβης το ποσοστό υπέρβασης της αντοχής της υπό μελέτη διατομής δίνει καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους (Αργυρουδης, κ.α., 2008)..

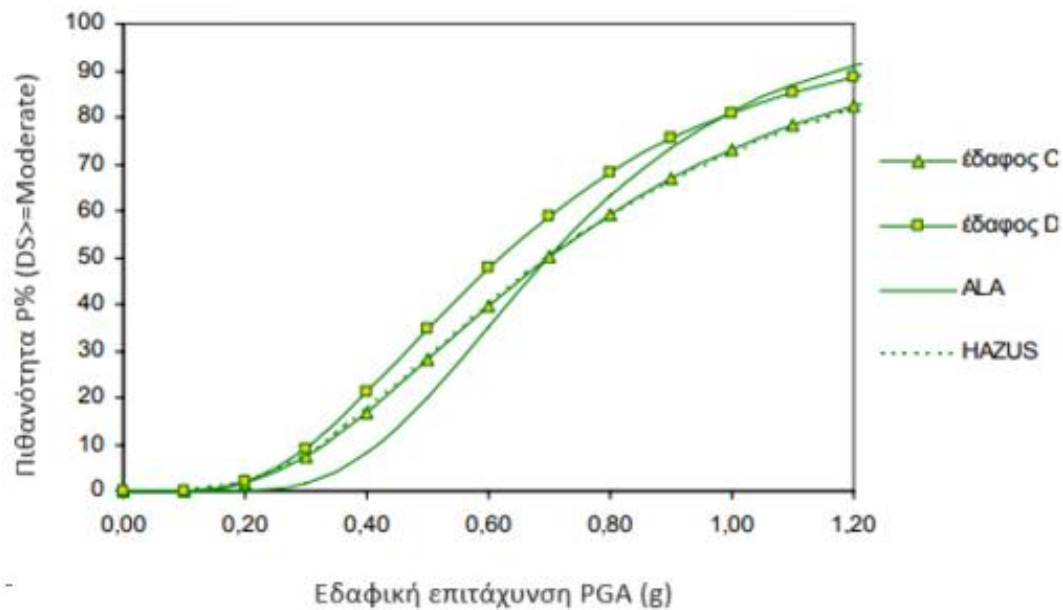
Χρησιμοποιούνται δύο τυπικές διατομές σηράγγων των Metro Θεσσαλονίκης και Αθήνας. Μίας κυκλικής διατομής διαμέτρου 10m και μία ορθογωνική διαστάσεων 16 X 12m. Η πάνω επιφάνεια θεωρήθηκε στο βάθος των 10m και για τις δύο διατομές και το συνολικό βάθος έως την βραχώδη επιφάνεια τα 60m. Επιλέχθηκαν οι κατηγορίες εδάφους B, C και D κατά EC8, ως προς τον εδαφικό τύπο. Τα σεισμικά μεγέθη που εισάχθηκαν στο μοντέλο επιλέχθηκαν από πέντε καταγραφές α) σεισμού Κοζάνης 1995 με $M=6,6R$, β) σεισμού PalmSprings στις ΗΠΑ το 1986 με $M=6,0R$, γ) σεισμού Montenegro το 1979 με $M=6,6R$, δ) σεισμού Πάρνηθας το 1999 με $M=5,9R$ και ε) σεισμού Kocaeli στην Τουρκία το 1999 με $M=7,4R$.

Στα παρακάτω Σχήματα 2.46 – 2.49 απεικονίζονται οι καμπύλες τρωτότητας για δύο τύπους διατομών και τρεις τύπους εδάφους, καθώς και για μικρές είτε μέτριες βλάβες κατά HAZUS. Μετέπειτα, αυτές συγκρίνονται με υπάρχουσες καμπύλες τρωτότητας (ALA, 2001). Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της σήραγγας υπό σεισμική φόρτιση βασικό ρόλο έχει το έδαφος. Παρατηρείται διαφοροποίηση στην απόκριση της κάθε διατομής ανάλογα με το εδαφικό προφίλ.

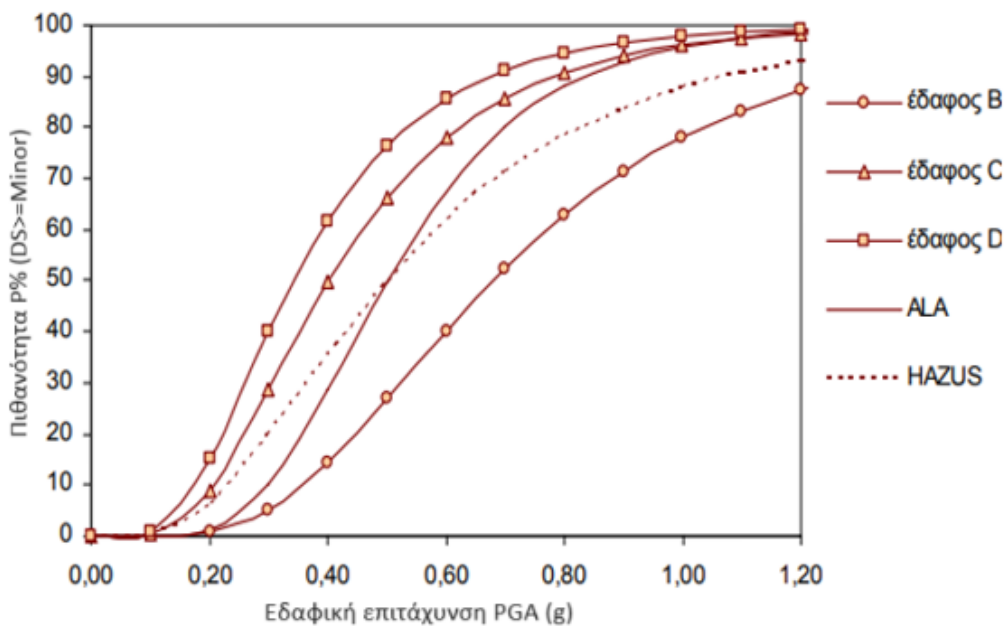
Όσο μειώνεται η αντίσταση που επιφέρει το έδαφος, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης.



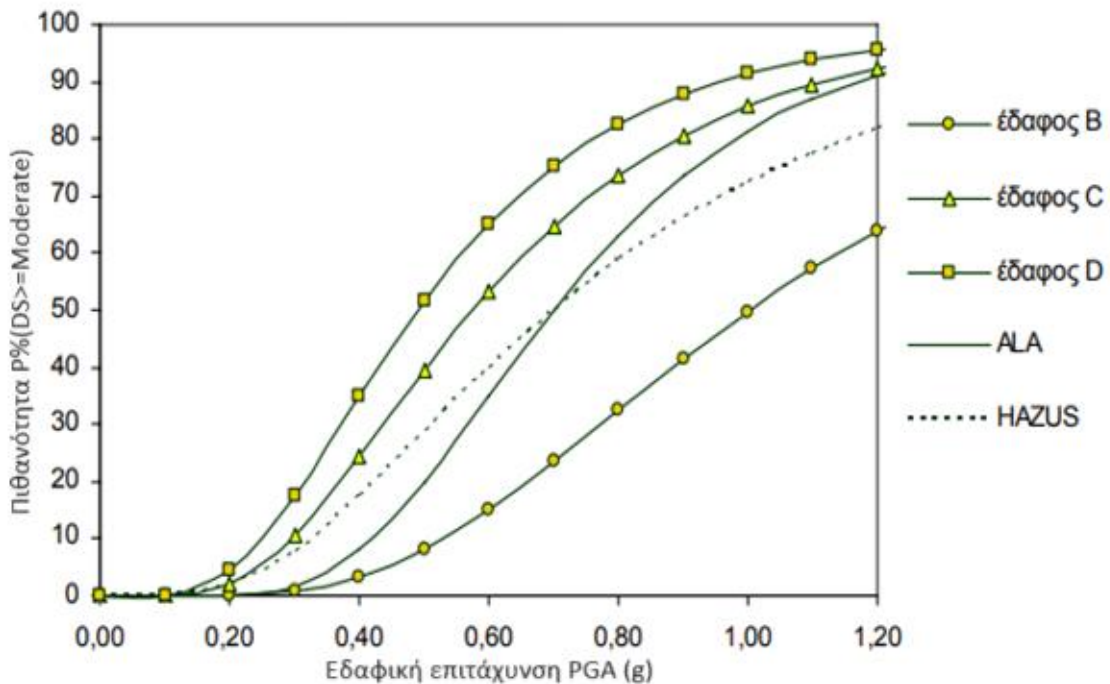
Σχήμα 2.46: Αναλυτικές και εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για σήραγγα κυκλικής διατομής για μικρές βλάβες (Αργυρουδης, κ.α., 2008).



Σχήμα 2.47: Αναλυτικές και εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για σήραγγα κυκλικής διατομής για μέτριες βλάβες (Αργυρουδης, κ.α., 2008).



Σχήμα 2.48: Αναλυτικές και εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για σήραγγα ορθογωνικής διατομής για μικρές βλάβες (Αργυρουδής, κ.α., 2008).



Σχήμα 2.49: Αναλυτικές και εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για σήραγγα ορθογωνικής διατομής για μέτριες βλάβες (Αργυρουδής, κ.α., 2008).

Από τις παραπάνω καμπύλες προκύπτει ότι οι εκτεταμένες βλάβες είναι πιθανό να εμφανιστούν κυρίως στο έδαφος C για την κυκλική και ορθογωνική διατομή. Στο έδαφος B οι προβλεπόμενες βλάβες είναι μικρότερες. Οι βλάβες μετρίου επιπέδου προκύπτουν μόνο στο έδαφος C για την

κυκλική διατομή, ενώ για την ορθογωνική προκύπτουν σε όλα τα εδάφη. Τέλος, μικρές βλάβες είναι πιθανό να εμφανιστούν σε όλους τους εδαφικούς τύπους.

Συμπερασματικά, η σύγκριση με υπάρχουσες εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας (ALA) εκφράζουν μία μέση συμπεριφορά των σηράγγων ανεξάρτητα των εδαφικών χαρακτηριστικών τους και αφορούν όλους τους τύπους βλαβών, με αποτέλεσμα το ενδεχόμενο λάθους στην εκτίμηση της πιθανότητας βλάβης μίας σήραγγας.

2.2.2.2 Καμπύλες Τρωτότητας Σηράγγων ολομέτωπης διάνοιξης με τη μέθοδο «cut and cover»

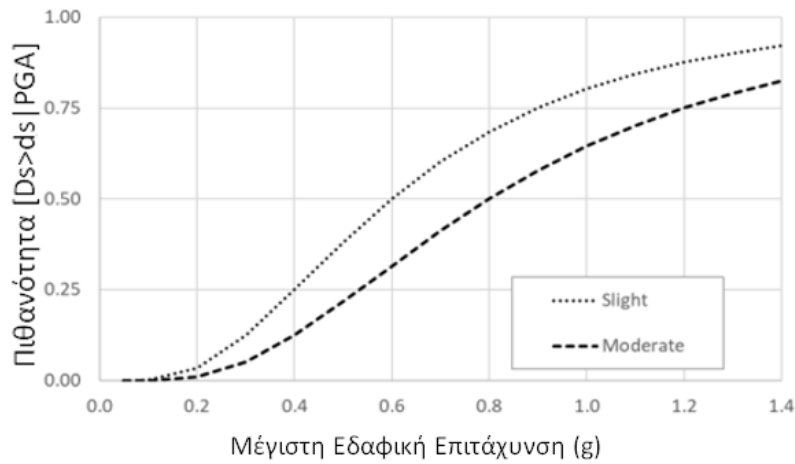
Μέσω της μεθοδολογίας HAZUS δίνονται εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας σε όρους πιθανότητας για σήραγγες ολομέτωπης διάνοιξης σύμφωνα με τη μέθοδο «cut and cover». Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη αναφέρονται στους Πίνακας 2.12 -Πίνακας 2.13 (Φωτοπούλου, 2007) και (HAZUS, 2020). Οι καμπύλες τρωτότητας είναι συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (Σχήμα 2.50 -Σχήμα 2.51) καθώς και μετακίνησης (Σχήμα 2.52).

Πίνακας 2.12: Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση κατά τη σύγκριση μεθόδων διάνοιξης σηράγγων (Φωτοπούλου, 2007).

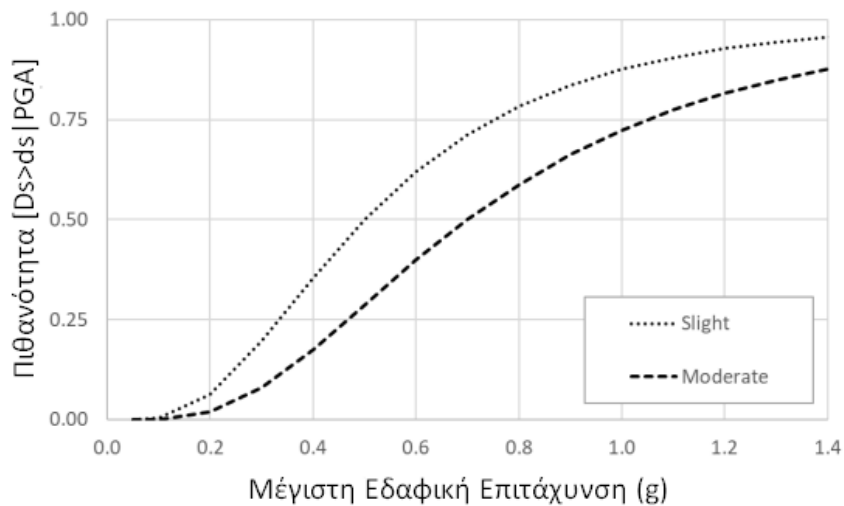
Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA)			
Ταξινόμηση	Επίπεδο αστοχίας	Μέση τιμή (g)	Τυπική απόκλιση (β)
Ολομέτωπη διάνοιξη (HTU 1)	Μικρές βλάβες	0,6	0,6
	Μέτριες βλάβες	0,8	0,6
Cut & Cover (HTU 2)	Μικρές βλάβες	0,5	0,6
	Μέτριες βλάβες	0,7	0,6

Πίνακας 2.13: Μόνιμη εδαφική μετακίνηση κατά τη σύγκριση μεθόδων διάνοιξης σηράγγων (Φωτοπούλου, 2007).

Μόνιμη εδαφική μετακίνηση (PGD)			
Ταξινόμηση	Επίπεδο αστοχίας	Μέση τιμή (g)	Τυπική απόκλιση (β)
Ολομέτωπη διάνοιξη (HTU 1)	Μικρές/ Μέτριες βλάβες	6,0	0,7
	Εκτεταμένες βλάβες	12,0	0,5
	Καθολικές βλάβες	60,0	0,5
Cut & Cover (HTU 2)	Μικρές/ Μέτριες βλάβες	6,0	0,7
	Εκτεταμένες βλάβες	12,0	0,5
	Καθολικές βλάβες	60,0	0,5

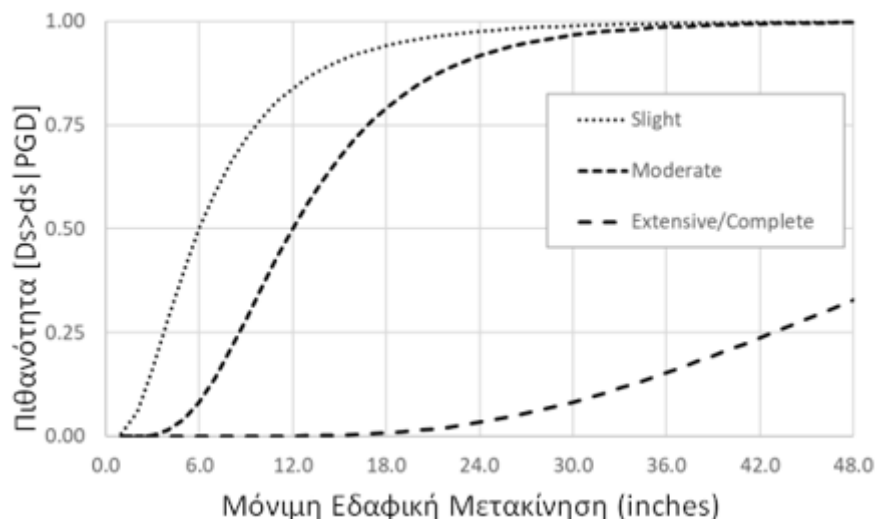


Σχήμα 2.50: Καμπύλες Τρωτότητας (Fragility Curves) Σηράγγων Ολομέτωπης Διάνοιξης, συναρτήσει της εδαφικής επιτάχυνσης (Φωτοπούλου, 2007).



Σχήμα 2.51: Καμπύλες Τρωτότητας (Fragility Curves) Σηράγγων με μέθοδο «cut and cover», συναρτήσει της εδαφικής επιτάχυνσης (Φωτοπούλου, 2007).

Στο Σχήμα 2.52 παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει της εδαφική μετακίνησης για τις σήραγγες ολομέτωπης διάνοιξης, με τη μέθοδο «cut and cover».



Σχήμα 2.52: Καμπύλες Τρωτότητας (Fragility Curves) Σηράγγων Ολομέτωπης Διάνοιξης και «cut & cover» συναρτήσε της εδαφικής μετακίνησης (Φωτοπούλου, 2007).

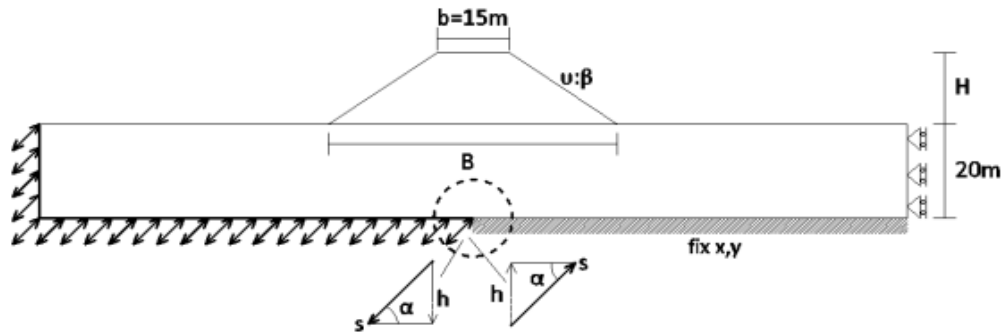
2.3 Οδοί

2.3.1 Καμπύλες Τρωτότητας Επιχωμάτων Οδοποιίας

Τα επιχώματα οδοποιίας αποτελούν σημαντικό μέρος του μεταφορικού συστήματος καθώς μεταφέρουν ανθρώπους και υλικά αγαθά. Σε περίπτωση αστοχίας μετά από ένα σεισμικό γεγονός μπορεί να υπάρξουν περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες.

Ερευνητές παρουσιάζουν μελέτη απόκρισης τριών τυπικών επιχωμάτων οδοποιίας (E1, E2, E3) με διαφορετική γεωμετρία, λόγω διάδοσης της διάρρηξης κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων (Πεταλά, κ.α., 2023). Η ανάπτυξη των καμπυλών τρωτότητας έγινε με τη χρήση μιας συνάρτησης αθροιστικής λογαριθμικής-κανονικής κατανομής και της πιθανότητας υπέρβασης μιας κατάστασης βλάβης για τρία επιλεγμένα επίπεδα βλάβης. Ως μέτρο έντασης λαμβάνεται η μετατόπιση του βραχώδους υποβάθρου που οφείλεται στα ρήγματα και ως δείκτης βλάβης λαμβάνεται η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση της εξωτερικής επιφάνειας του επιχώματος.

Δημιουργήθηκαν καμπύλες τρωτότητας για διάρρηξη κανονικού και ανάστροφου ρήγματος και η περίπτωση κατά την οποία ο τύπος του ρήγματος (κανονικό ή ανάστροφο) δεν είναι γνωστό. Οι γωνίες διάρρηξης και των δύο ειδών ρηγμάτων είναι $\alpha = 35^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ και η κάθετη μετατόπιση $h = 0,5\text{m}, 1,0\text{m}, 1,5\text{m}, 2,0$. Τα επιχώματα θεμελιώνονται σε αμμώδες έδαφος, το οποίο βρίσκεται σε βραχώδες υπόβαθρο και η επιφάνεια του εδάφους θεωρείται οριζόντια. Το προσομοίωμα στο Σχήμα 2.53, χωρίζεται σε δύο τμήματα, το ένα σταθερό, ενώ το δεύτερο κινείται παράλληλα με τη διάρρηξη.



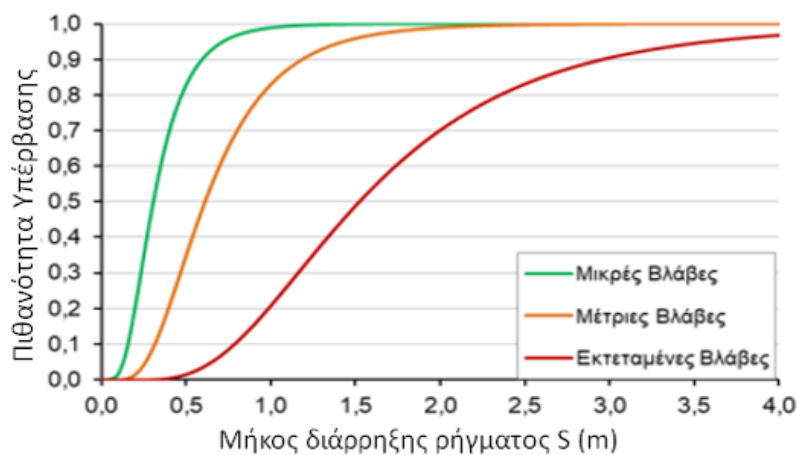
Σχήμα 2.53: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοιώματος επιχώματος

Τα ύψη και η κλίση των πρανών διαφοροποιούνται όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.14. Το πλάτος της στέψης και στις τρεις περιπτώσεις θεωρείται σταθερό ίσο με 15m και τέλος το πάχος της αμμώδους στρώσης ίσο με 20m (Πεταλά, κ.α., 2023).

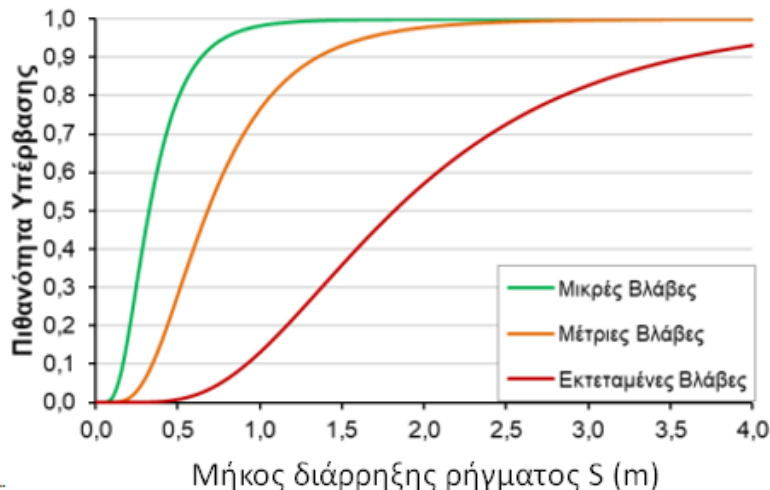
Πίνακας 2.14: Γεωμετρικές Παράμετροι Προσομοιώματος (Πεταλά, κ.α., 2023).

Επίχωμα	H (m)	υ:β	B (m)
E1	15	2:3	60
E2	15	1:2	39
E3	8	2:3	75

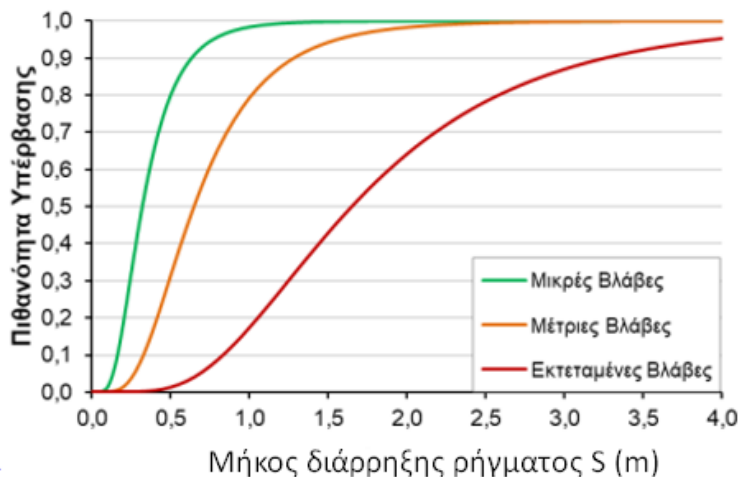
Στα Σχήμα 2.54 -Σχήμα 2.55 παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας επιχωμάτων οδοποιίας λόγω διάρρηξης κανονικού και ανάστροφου ρήγματος αντίστοιχα.



Σχήμα 2.54: Καμπύλη Τρωτότητας Επιχωμάτων Οδοποιίας λόγω διάδοσης διάρρηξης κανονικού ρήγματος (Πεταλά, κ.α., 2023).



Σχήμα 2.55: Καμπύλη Τρωτότητας Επιχωμάτων Οδοποιίας λόγω διάδοσης διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος (Πεταλά, κ.α., 2023).



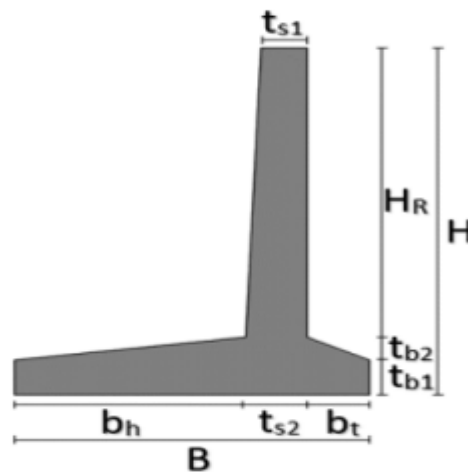
Σχήμα 2.56: Καμπύλες Τρωτότητας Επιχωμάτων Οδοποιίας λόγω διάδοσης διάρρηξης ρήγματος ολίσθησης (άγνωστο ρήγμα) (Πεταλά, κ.α., 2023).

Από τις παραπάνω καμπύλες τρωτότητας παρατηρείται ότι η πιθανότητα υπέρβασης οι οποίες λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές για διάρρηξη είναι αυτή των κανονικών ρηγμάτων, ενώ οι μικρότερες υπερβάσεις θα συμβούν λόγω των ανάστροφων ρηγμάτων. Σε περίπτωση εκτεταμένων βλαβών η διαφορά είναι μεγαλύτερη. Σε ένα ρήγμα άγνωστο για την πιθανότητα υπέρβασης λαμβάνονται ενδιάμεσες τιμές (Σχήμα 2.56).

Για μετατόπιση ρήγματος ίση με 0,5m δεν θα εμφανίσει σημαντικές βλάβες, ενώ η πιθανότητα εμφάνισης μικρών βλαβών είναι πολύ υψηλή έως 80%. Όταν η μετατόπιση ισούται με 1m, η πιθανότητα εμφάνισης εκτεταμένων βλαβών αυξάνεται σε όλες τις περιπτώσεις και οι πιθανότητες για μέτριες και μικρές βλάβες είναι μεγαλύτερες από 75%. Τέλος, για τιμές μεγαλύτερες των 2m η πιθανότητα να εμφανιστούν εκτεταμένες βλάβες είναι μεγαλύτερη από 60% σε όλες τις περιπτώσεις.

2.3.2 Καμπύλες τρωτότητας σε Τοίχους Αντιστήριξης

Οι σεισμικές διεγέρσεις σε έργα αντιστήριξης μπορούν να προκαλέσουν βλάβες που θα επηρεάσουν άμεσα την λειτουργία του οδικού δικτύου. Ερευνητές παρουσιάζουν μελέτη των καμπυλών τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με πέδιλα που αφορούν υφιστάμενες κατασκευές του οδικού άξονα της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Η σεισμική απόκριση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 2D, συναρτήσκει της παραμένουσας κατακόρυφης μετατόπισης του υλικού επίχωσης U_y και της ολίσθησης της βάσης του τοίχου αντιστήριξης U_x , για τρία προσομοιώματα τοίχων αντιστήριξης των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.15 (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).

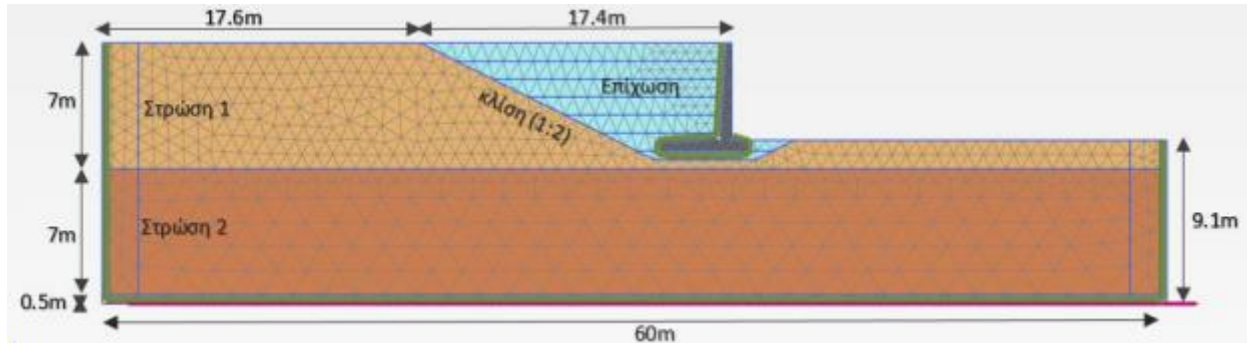


Σχήμα 2.57: Προσομοίωμα τοίχου αντιστήριξης

Πίνακας 2.15: Χαρακτηριστικά προσομοιώματος των τριών τοίχων αντιστήριξης (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).

	Προσομοίωμα Α	Προσομοίωμα Β	Προσομοίωμα Γ
H (m)	3.00	6.00	9.00
B (m)	2.30	4.70	7.00
H _R (m)	2.50	5.40	8.10
t _{b1} (m)	0.30	0.40	0.50
t _{b2} (m)	0.20	0.20	0.40
t _{s1} (m)	0.30	0.30	0.30
t _{s2} (m)	0.40	0.60	0.90
b _h (m)	1.90	3.92	5.83
b _t (m)	0.40	0.78	1.17

Το προσομοίωμα του τοίχου αντιστήριξης με πεδίλο (Σχήμα 2.57) έχει εδαφικό υλικό έως 1m κάτω από τη στάθμη έδρασης του πεδύλου (στρώση 1), ενώ η δεύτερη στρώση έχει πάχος 7m (στρώση 2). Στη βάση του προσομοιώματος υπάρχει βραχώδες υπόβαθρο και το συνολικό πλάτος του προσομοιώματος είναι 60m (Σχήμα 2.58).



Σχήμα 2.58: Δισδιάστατο προσομοίωμα εδάφους - τοίχου αντιστήριξης με ύψος H=6μέτρα

Για την διεξαγωγή των δυναμικών αναλύσεων επιλέχθηκαν 8 πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις του ελληνικού χώρου (Πίνακας 2.16).

Πίνακας 2.16: Χαρακτηριστικά σεισμικών καταγραφών που αξιοποιήθηκαν για τις δυναμικές αναλύσεις (Κουτσοπάκη, κ.α., 2023).

	Σεισμικό συμβάν	M _w	R (km)	V _{s,30} (m/s)	Καταγραφή	PGA (g)	T _p (s)	D _{S5,95} (s)
1	Αθήνα 1999	6	18,8	1020	ATH4_L	0.1209	0.10	6.51
2	Αθήνα 1999	4,6	21,23	1020	ATH4_L2	0.028	0.16	2.60
3	Κεφαλονιά 2014	6,1	37,27	1183	VSK1_E	0.0798	0.14	4.22
4					VSK1_N	0.0987	0.12	4.78
5					VLSA_E	0.1998	0.06	5.70
6	Εύβοια	5,3	22,4	872	VLSA_N	0.2619	0.06	6.22
7					ZKRA_E	0.0504	0.12	15.08
9	Κρήτη 2015	6,1	61,12	877	ZKRA_N	0.0571	0.34	15.73

Όπου, M_w είναι η ένταση του σεισμικού γεγονότος, R είναι το βάθος του επίκεντρου, V_{s,30} είναι η μέση ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος σε βάθος άνω των 30m, PGA είναι η εδαφική επιτάχυνση, T_p είναι η ιδιοπερίοδος του ρήγματος και D_{S5-95} είναι η διάρκεια της σεισμικής έντασης.

Τα επίπεδα βλάβης για τοίχους αντιστήριξης τέθηκαν σύμφωνα με τους (Κουτσοπάκη, κ.α., 2023) στον Πίνακα 2.17. Αναλυτικότερα για την οριζόντια μετατόπιση της βάσης του τοίχου δόθηκαν τρεις τιμές του δείκτη βλάβης U_x συναρτήσει με το ύψος του τοίχου με ποσοστό 2,5,10 % του

ύψους και για την καθίζηση του υλικού επίχωσης συναρτήσει τριών μέσων τιμών του δείκτη βλάβης U_y ίσες με 0,05, 0,15, 0,40μ.

Ως παράμετροι της σεισμικής έντασης επιλέχθηκαν η εδαφική επιτάχυνση (PGA), η εδαφική ταχύτητα (PGV) και η αθροιστική απόλυτη ταχύτητα (CAV), στην κορυφή του τοίχου αντιστήριξης σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 2.18 για την κατακόρυφη μετατόπιση U_x (Calvi, et al., 2006).

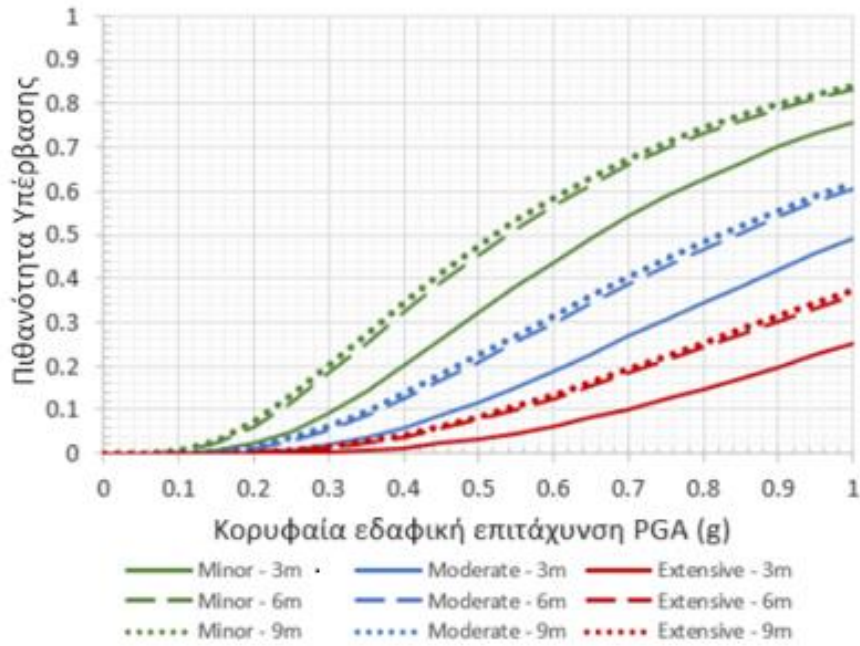
Πίνακας 2.17: Επίπεδα βλάβης τοίχων αντιστήριξης (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).

Επίπεδο βλάβης	U_x (m)	U_y (m)	Λειτουργικότητα οδού
DS1: Μικρές	0,02 H	0,05	Ανοιχτή, μειωμένες ταχύτητες ή μερικώς κλειστή
DS2: Μέτριες	0,05 H	0,15	Κλειστή ή μερικώς κλειστή
DS3: Εκτεταμένες	0,10 H	0,40	Κλειστή

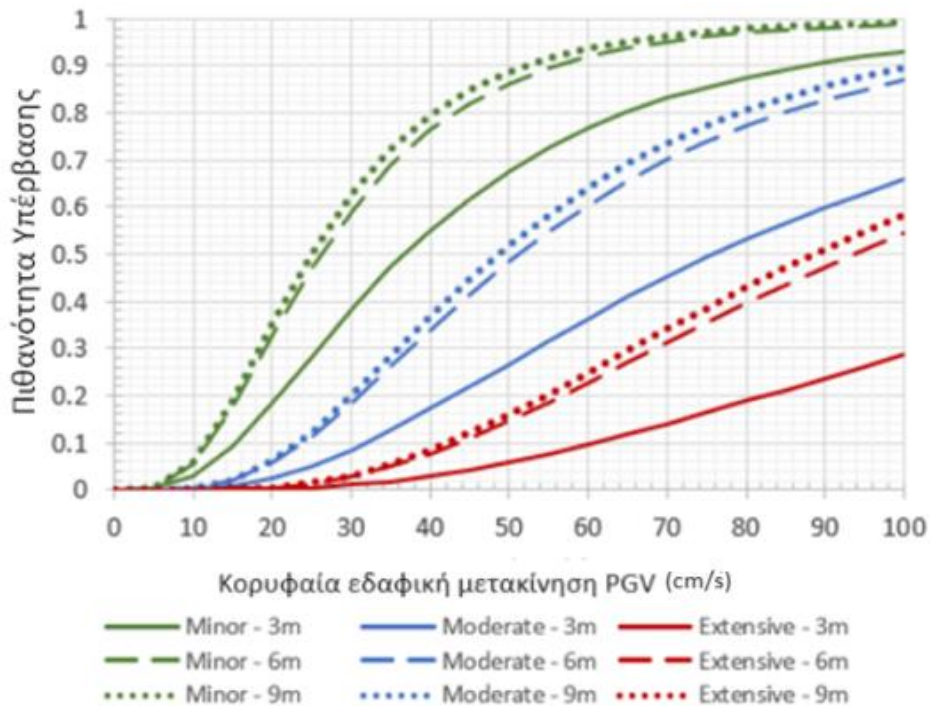
Πίνακας 2.18: Παράμετροι Καμπυλών Τρωτότητα για την περίπτωση του δείκτη βλάβης κατακόρυφης μετατόπισης U_y (Κουτσουπάκη, κ.α., 2023).

IM mi- U_y	PGA (g)			PGV (cm/s)			CAV (cm/s)		
	3m	6m	9m	3m	6m	9m	3m	6m	9m
0.05m	0.659	0.538	0.520	36.822	26.076	24.881	1733.0	1211.1	1149.0
0.15m	1.014	0.842	0.823	76.041	51.229	48.677	3707.5	2548.4	2448.0
0.40m	1.490	1.257	1.238	145.64	93.612	88.621	7310.5	4951.2	4809.2
β_{tot}	0.594	0.645	0.657	0.674	0.954	0.575	0.621	0.599	0.609

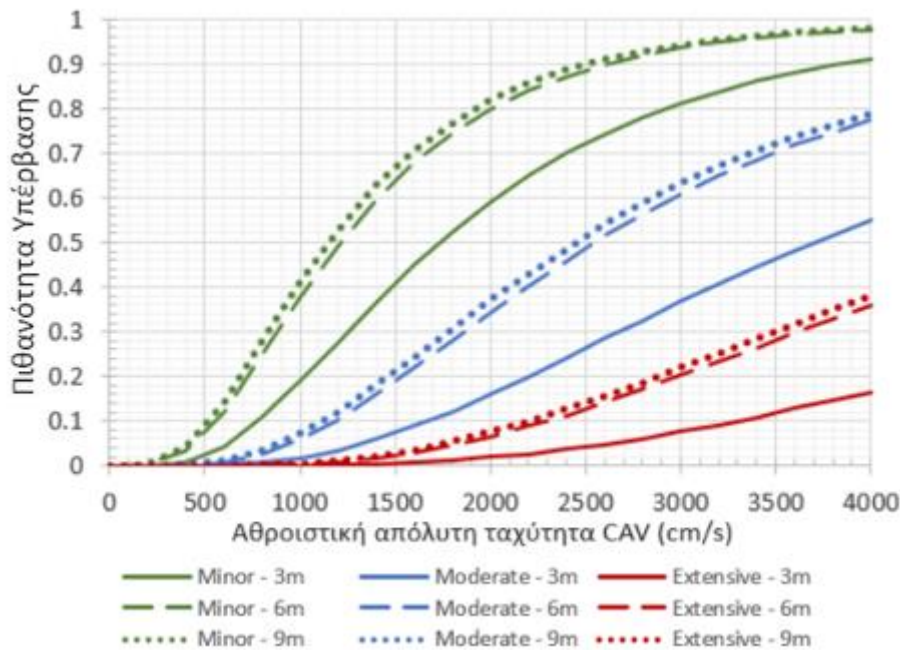
Στα Σχήμα 2.59 - Σχήμα 2.61 παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας των τοίχων αντιστήριξης με ύψη 3, 6 και 9m για την κατακόρυφη μετατόπιση του υλικού επίχωσης συναρτήσει των παραμέτρων PGA, PGV, CAV αντίστοιχα.



Σχήμα 2.59: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την κατακόρυφη μετατόπιση του υλικού επίχωσης για παράμετρο έντασης την κορυφαία εδαφική επιτάχυνση PGA (Κουτσοπάκη, κ.α., 2023).



Σχήμα 2.60: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την κατακόρυφη μετατόπιση του υλικού επίχωσης για παράμετρο έντασης την κορυφαία εδαφική ταχύτητα PGV (Κουτσοπάκη, κ.α., 2023).



Σχήμα 2.61: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την κατακόρυφη μετατόπιση του υλικού επίχωσης για παράμετρο έντασης αθροιστική απόλυτη ταχύτητα CAV (Κουτσοπούκη, κ.α., 2023).

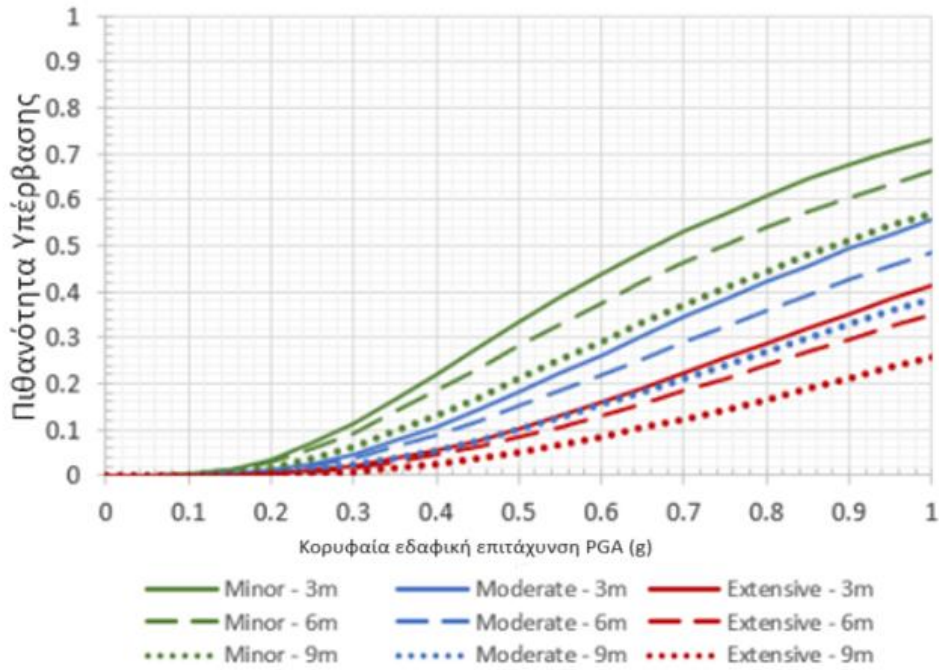
Από τις παραπάνω καμπύλες τρωτότητας παρατηρείται ότι οι καμπύλες με παράμετρο την εδαφική επιτάχυνση έχουν μικρότερες πιθανότητες βλάβης από αυτές της εδαφικής ταχύτητας και την αθροιστική απόλυτη ταχύτητα. Διαπιστώνεται ότι οι τοίχοι με μεγαλύτερο ύψος έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης των επιπέδων βλάβης.

Στον Πίνακα 2.19 παρουσιάζονται οι παράμετροι σεισμικής έντασης που λήφθηκαν υπόψη στην περίπτωση της οριζόντιας μετατόπισης U_x (Calvi, et al., 2006).

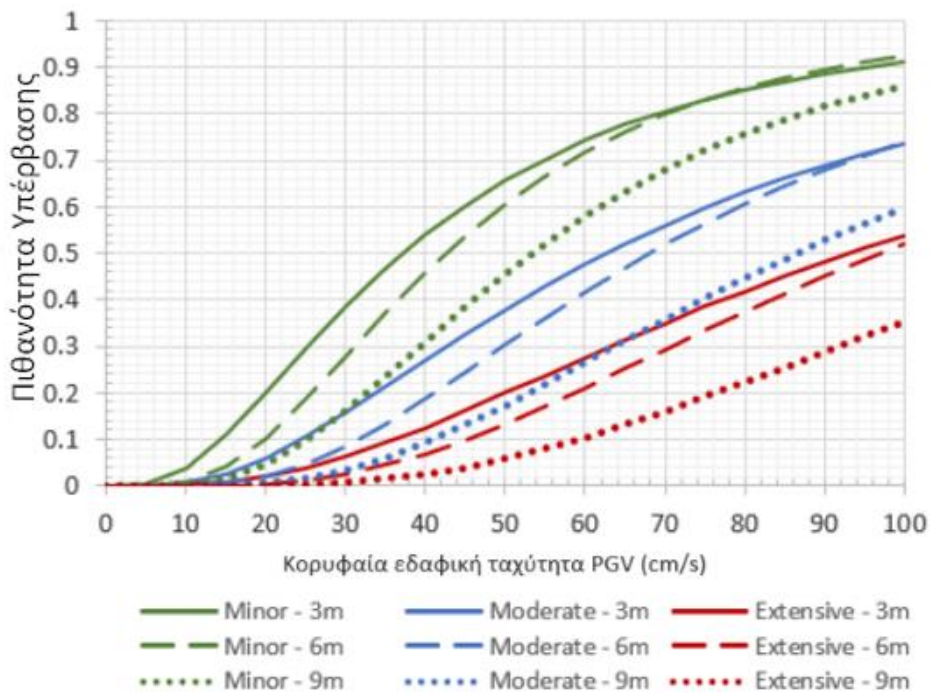
Πίνακας 2.19: Παράμετροι Καμπυλών Τρωτότητας για την περίπτωση του δείκτη βλάβης της οριζόντιας μετατόπισης U_x (Κουτσοπούκη, κ.α., 2023).

IM mi- U_x	PGA (g)			PGV (cm/s)			CAV (cm/s)		
	3m	6m	9m	3m	6m	9m	3m	6m	9m
2%H m	0.666	0.747	0.882	37.196	42.495	53.416	1738.7	2085.1	2707.3
5%H m	0.911	1.027	1.230	62.737	68.065	86.599	2958	3521.7	4654.5
10%H m	1.157	1.306	1.582	93.169	97.204	124.81	4421.5	5235.3	7012.8
β_{tot}	0.660	0.693	0.702	0.736	0.599	0.581	0.627	0.623	0.618

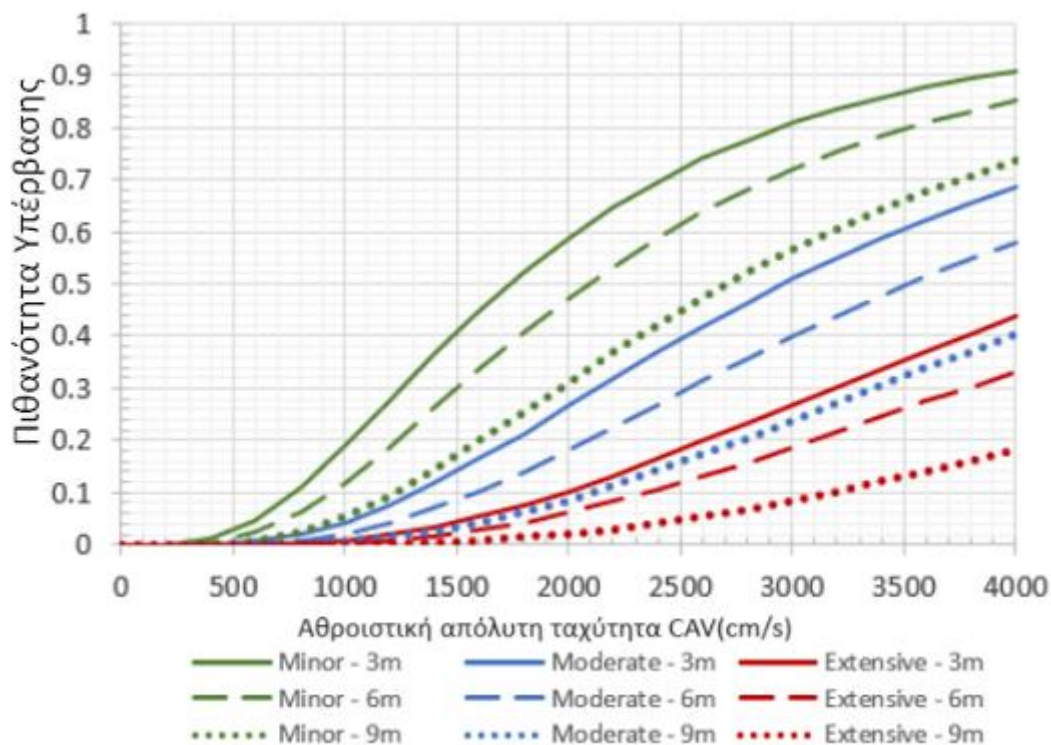
Στα Σχήμα 2.62 -Σχήμα 2.64 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA, εδαφικής ταχύτης PGV και αθροιστικής απόλυτης ταχύτητας CAV και για τις 3 περιπτώσεις τοίχων αντιστήριξης, με διαφορετικά ύψη.



Σχήμα 2.62: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την οριζόντια μετατόπιση της βάσης του τοίχου με παράμετρο έντασης την κορυφαία εδαφική επιτάχυνση PGA (Κουτσοπούκη, κ.α., 2023).



Σχήμα 2.63: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την οριζόντια μετατόπιση της βάσης του τοίχου με παράμετρο έντασης την κορυφαία εδαφική ταχύτητα PGV (Κουτσοπούκη, κ.α., 2023).



Σχήμα 2.64: Καμπύλη Τρωτότητας τοίχων αντιστήριξης με δείκτη βλάβης την οριζόντια μετατόπιση της βάσης του τοίχου με παράμετρο έντασης την αθροιστική απόλυτη ταχύτητα CAV (Κουτσοπούκη, κ.α., 2023).

Στα Σχήματα 2.62-2.64 υπολογίστηκαν οι καμπύλες τρωτότητας με δείκτη βλάβης τη μόνιμη οριζόντια μετατόπιση της βάσης του τοίχου. Παρατηρήθηκε ότι και σε αυτή την περίπτωση οι παράμετροι της εδαφικής επιτάχυνσης δίνουν μικρότερες πιθανότητες αστοχίας για όλες τις στάθμες βλάβης. Επίσης, από τα τρία διαγράμματα οι μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης προκύπτουν στους τοίχους με τα μικρότερα ύψη, λόγω των διαφορετικών τιμών οριακών καταστάσεων βλάβης, δηλαδή ο τοίχος αντιστήριξης με ύψος ίσο με 3m απαιτεί μικρότερες τιμές για την υπέρβαση των τριών επιπέδων βλάβης.

Συγκριτικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους δείκτες βλάβης για οριζόντια και για κατακόρυφη μετακίνηση υλικού επίχωσης, προκύπτουν δυσμενέστερα αποτελέσματα για την περίπτωση υπολογισμού με τον δείκτη βλάβης της κατακόρυφης μετακίνησης.

Συμπερασματικά οι καμπύλες τρωτότητας συναρτήσεως της οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης έχουν λιγότερες πιθανότητες εμφάνισης βλάβης σε σχέση με τις οριζόντιες μετακινήσεις και την απόλυτη αθροιστική ταχύτητα. Στις δοκιμές της κατακόρυφης μετακίνησης τα αποτελέσματα είναι ακόμα πιο επιβλαβή, ιδιαίτερα στους τοίχους αντιστήριξης με μεγαλύτερο ύψος. Αντίθετα οι καμπύλες τρωτότητας συναρτήσεως των οριζόντιων μετακινήσεων παρουσιάζουν δυσχερέστερα αποτελέσματα στους τοίχους αντιστήριξης με μικρότερο ύψος.

2.4 Λιμενικά Έργα

Οι λιμενικές εγκαταστάσεις αποτελούν τμήμα του δικτύου μεταφορών μίας χώρας, έχοντας σημαντικό ρόλο, όπως οικονομικό, στρατιωτικό, πολιτιστικό κ.ο.κ. Ο σκοπός τους είναι η επικοινωνία και η μεταφορά ανθρώπων και εμπορευμάτων μέσω της θάλασσας.

2.4.1 Καμπύλες Τρωτότητας Κρηπιδότοιχων Βαρύτητας

Οι κρηπιδότοιχοι αποτελούν τμήμα των λιμενικών κατασκευών και είναι κατασκευασμένοι παράλληλα στις ακτές με σκοπό της πρυμνοδέτησης και φορτοεκφόρτωσης των πλοίων. Χρησιμοποιείται η αναλυτική μεθοδολογία για την αποτίμηση της τρωτότητας τους και διακρίνονται ανάλογα την γεωμετρία τους, το είδος της διατομής, το υλικό κατασκευής, τον τρόπο θεμελίωσης και το είδος αγκύρωσης εφόσον υπάρχει, τα οποία χαρακτηριστικά αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην σεισμική απόκριση (Δημητρίου, 2008).

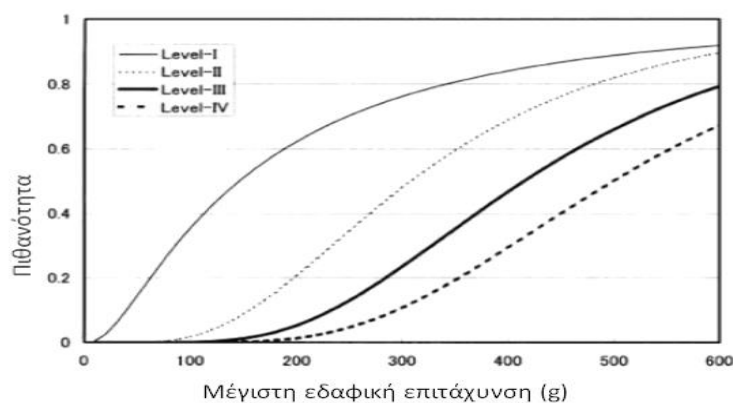
A) Κρηπιδότοιχοι με βάση τον ερευνητή Ichii

Ο ερευνητής Ichii (2003) χρησιμοποίησε δύο μοντέλα Κρηπιδότοιχων, έναν ($D_1=0$) τοποθετημένο σε ένα μη βελτιωμένο έδαφος και τον δεύτερο ($D_1=1$) πάνω σε ένα στρώμα άμμου ίσο με το ύψος του τοίχου. Ορίζοντας τέσσερις στάθμες βλάβης με βάση το λόγο βάρους του κρηπιδότοιχου προς το ύψος του (W/H) (Ichii, 2003).

Πίνακας 2.20: Στάθμες βλάβης Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).

Βαθμός Βλάβης	Μετακίνηση / ολίσθηση προς την θάλασσα
Βαθμός Βλάβης 1 (μικρές)	1,5 – 5%
Βαθμός Βλάβης 2 (μεσαίες)	5-10%
Βαθμός βλάβης 3 (εκτεταμένες)	10-15%
Βαθμός Βλάβης 4 (οιονεί)	>15%

Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 2.65 παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας τεσσάρων σταθμών βλάβης (Πίνακας 2.20) για κρηπιδότοιχο βαρύτητας, σύμφωνα με τις παραμέτρους που λήφθηκαν υπόψη (Ichii, 2003).



Σχήμα 2.65: Καμπύλη τρωτότητας κρηπιδότοιχου βαρύτητας (Δημητρίου, 2008).

B) Κρηπιδότοιχοι με βάση υπολογισμούς κατά HAZUS

Η μεθοδολογία HAZUS (2004) προτείνει τις καμπύλες τρωτότητας για κρηπιδότοιχο βαρύτητας για τις τέσσερις στάθμες βλάβης, σύμφωνα με την εδαφική μετακίνηση. Λήφθηκαν υπόψη οι παράμετροι της εδαφικής ταχύτητας που περιγράφονται στον Πίνακα 2.21, καθώς και τα επίπεδα βλάβης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.22.

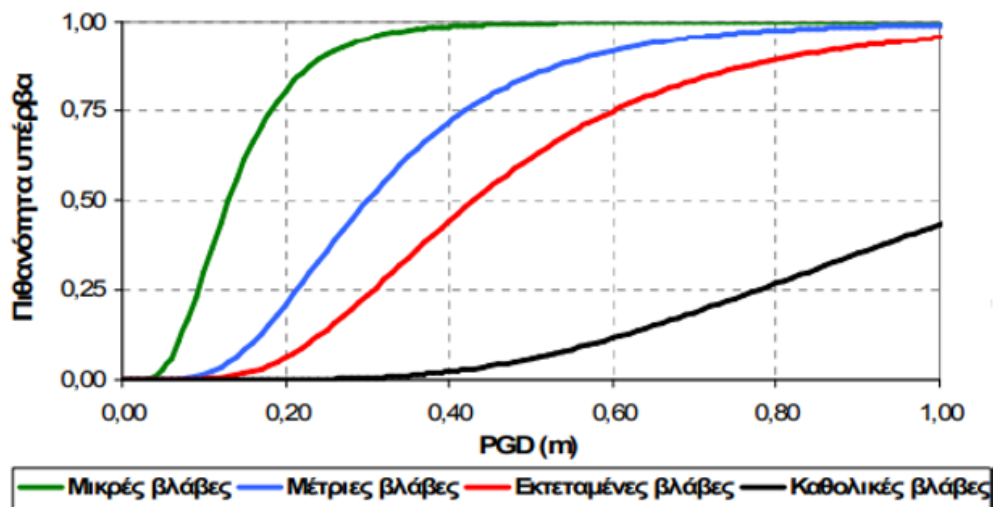
Πίνακας 2.21: Παράμετροι καμπυλών τρωτότητας Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).

Επίπεδο βλάβης	Μόνιμη εδαφική μετακίνηση PGD	
	Μέση τιμή (m)	Τυπική απόκλιση β
Μικρές βλάβες	0,13	0,50
Μέτριες βλάβες	0,30	0,50
Εκτεταμένες βλάβες	0,43	0,50
Καθολικές βλάβες	1,09	0,50

Πίνακας 2.22: Περιγραφή επιπέδων βλάβης Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).

Επίπεδα Βλάβης	Περιγραφή	Επίπεδο λειτουργικότητας	
		Μειωμένη λειτουργικότητα	Δυνατότητα χρήσης χωρίς επιδιορθώσεις
Μικρές Βλάβες	Μικρή μόνιμη εδαφική καθίζηση (λίγοι πάσσαλοι να παρουσιάζουν βλάβες)	Μειωμένη λειτουργικότητα	Δυνατότητα χρήσης χωρίς επιδιορθώσεις
Μεσαίες Βλάβες	Σημαντική μόνιμη εδαφική μετακίνηση (μερικού πάσσαλοι να παρουσιάζουν βλάβες και αστοχίες)	Μηδενική λειτουργικότητα	Δυνατότητα χρήσης μετά από επιδιορθώσεις
Εκτεταμένες Βλάβες	Αστοχία πολλών πασσάλων, ολίσθηση της αποβάθρας, σημαντική μόνιμη εδαφική μετακίνηση	Μηδενική λειτουργικότητα	Μηδενική δυνατότητα χρήσης
Καθολικές Βλάβες	Αστοχία των περισσότερων πασσάλων λόγω μεγάλης εδαφικής μετακίνησης. Εκτεταμένη βλάβη σε όλη την λιμενική εγκατάσταση	Μηδενική λειτουργικότητα	Μηδενική δυνατότητα χρήσης

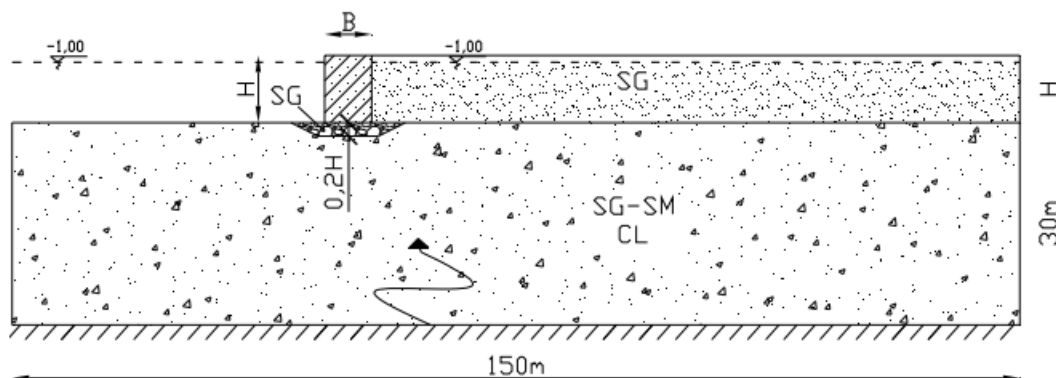
Στο Σχήμα 2.66 παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας, σύμφωνα με HAZUS (2004).



Σχήμα 2.66: Καμπύλες Τρωτότητας Κρηπιδότοιχου βαρύτητας (Δημητρίου, 2008).

Γ) Κρηπιδότοιχοι με βάση υπολογισμούς Ευρωκώδικα 8

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ερευνητική εργασία στην οποία μελετήθηκαν τέσσερις κρηπιδότοιχοι με τη χρήση του παρακάτω τυπικού μοντέλου προσομοίωσης (Σχήμα 2.67), και διαστάσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.23. Το έδαφος δεξιά από τον κρηπιδότοιχο έχει πάχος όσο το ύψος του και αποτελείται από αμμοχάλικο με ταχύτητα διατμητικού κύματος $V_s=400\text{m/s}$. Εδράζονται σε εδαφικό στρώμα με πάχος 30m, με διαφορετικούς συνδυασμούς εδαφών βάση Ευρωκώδικα 8 (Δημητρίου, 2008).



Σχήμα 2.67: Προσομοίωση εξεταζόμενοι κρηπιδότοιχοι

Πίνακας 2.23: Διαστάσεις των υπό μελέτη Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).

Κρηπιδότοιχος	Πλάτος B (m)	Ύψος H (m)
A	5	8
B	7	10
Γ	9	12
Δ	11	16

Ο μέσος όρος της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων για το εδαφικό στρώμα πάχους 30m, ορίζεται από την παράμετρο $V_{s,30}$.

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{V_i}\right)}$$

Όπου,

- h_i είναι το πάχος της εδαφικής στρώσης,
- V_i είναι η ταχύτητα διατμητικού κύματος και
- N είναι ο αριθμός των εδαφικών στρώσεων έως τα 30m

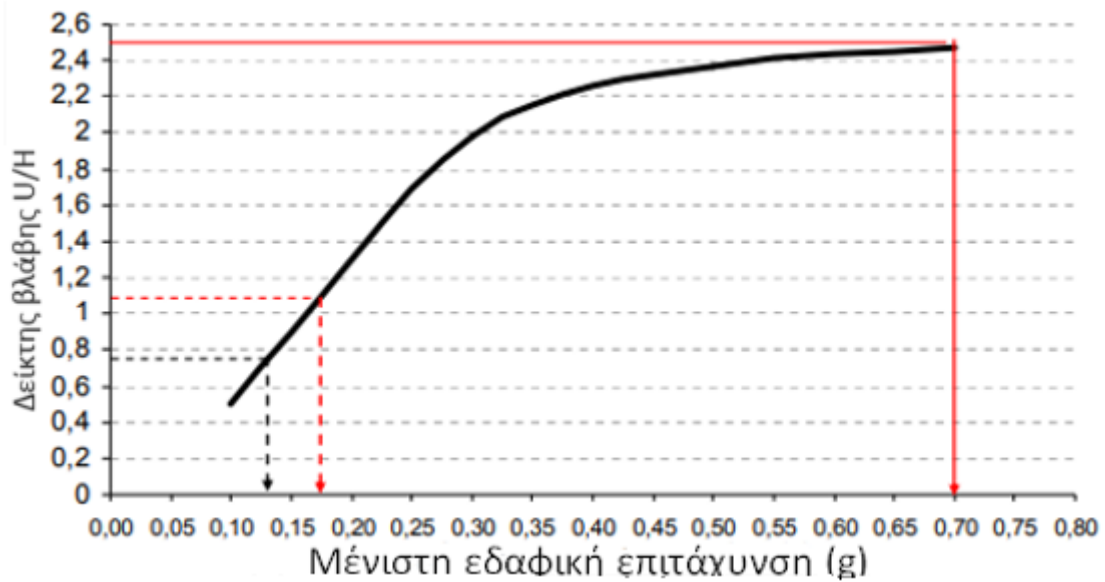
Η δημιουργία καμπυλών τρωτότητας πραγματοποιείται με την εκτίμηση της διασποράς και ορίζεται ο δείκτης βλάβης που χρησιμοποιήθηκε για τα αντίστοιχα επίπεδα βλάβης Κρηπιδότοιχων βαρύτητας διαστάσεων σύμφωνα με τον Πίνακας 2.23, χωρίς εξοπλισμό φόρτο-εκφόρτωσης. Τα επίπεδα βλάβης ορίζονται με βάση το λόγο d/H (Πίνακας 2.24), δηλαδή την παραμένουσα μετακίνηση προς το ύψος του κρηπιδότοιχου.

Πίνακας 2.24: Επίπεδα βλάβης κρηπιδότοιχου (Δημητρίου, 2008).

Επίπεδα βλάβης	Οριζόντια μετακίνηση (d/H)
Επίπεδο βλάβης 1 (μικρές- minor)	<1,5%
Επίπεδο βλάβης 2 (μεσαίες – moderate)	1,5 – 5%
Επίπεδο βλάβης 3 (εκτεταμένες – extensive)	5 – 10%
Επίπεδο βλάβης 4 (οιονεί – total)	>10%

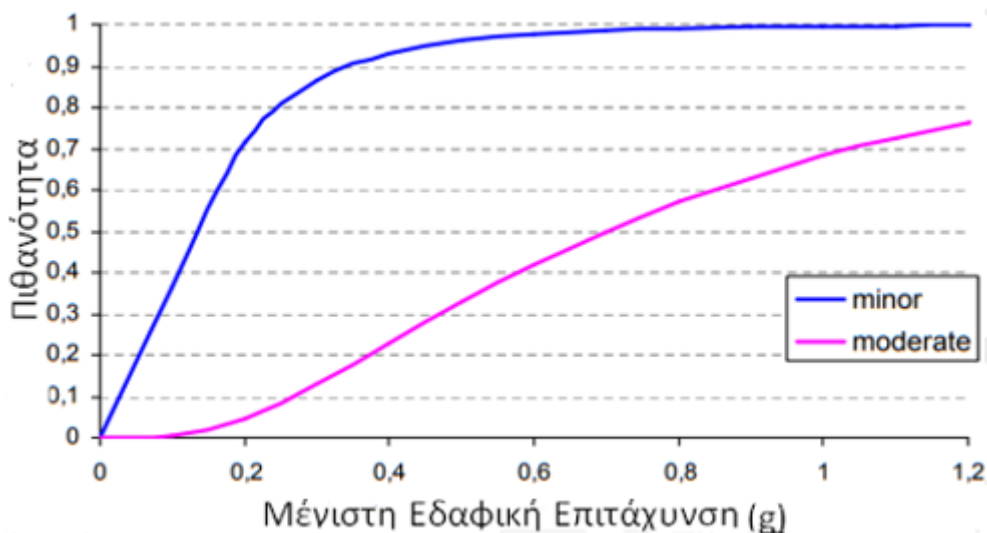
Υπολογίζονται στο παρακάτω Σχήμα 2.68 οι μέσες τιμές των επιταχύνσεων στη βάση του εδάφους, οι οποίες αντιστοιχούν στην μέση τιμή κάθε επιπέδου βλάβης. Οι μικρές βλάβες έχουν μέση τιμή επιτάχυνσης $PGA=0,13g$ και οι μέτριες βλάβες $0,7g$ στο σημείο όπου η καμπύλη τείνει να

σταθεροποιηθεί. Επίσης γίνεται εκτίμηση της διασποράς β , η οποία περιγράφει την διακύμανση των τιμών που αντιστοιχεί σε κάθε καμπύλη τρωτότητας και υπολογίστηκε από τη δυναμική ανάλυση 0,76 για μικρές και μέτριες βλάβες των 4 Κρηπιδότοιχων σε 4 εδαφικά προφίλ από το λογισμικό πρόγραμμα PLAXIS (Δημητρίου, 2008).



Σχήμα 2.68: Σχέση δείκτη βλάβης U/H με την επιτάχυνση στη βάση και μέσες τιμές PGA για μικρές και μέτριες βλάβες

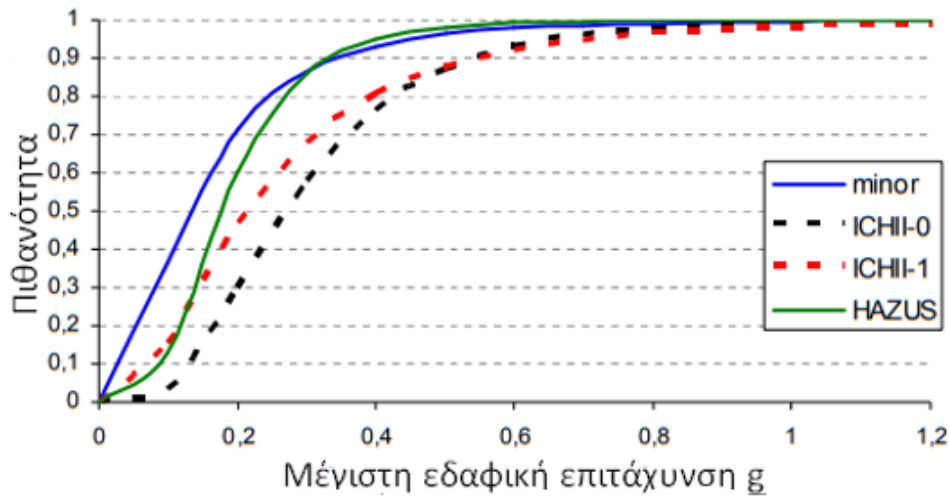
Στο Σχήμα 2.69 παρουσιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις αναλύσεις και αφορούν μόνο μικρές και μέτριες βλάβες.



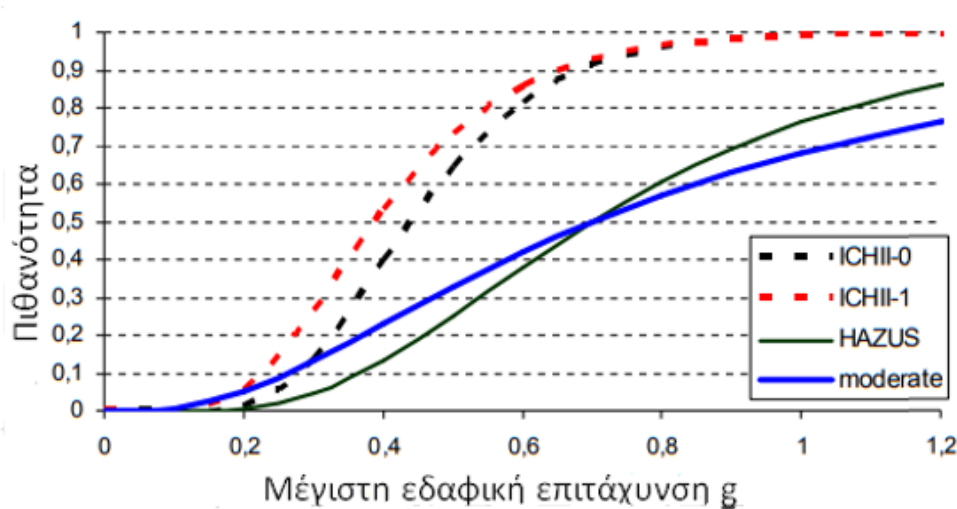
Σχήμα 2.69: Καμπύλες Τρωτότητας για μικρές και μέτριες βλάβες Κρηπιδότοιχων (Δημητρίου, 2008).

Δ) Σύγκριση υπολογισμών για κρηπιδότοιχους

Συγκρίνονται οι καμπύλες τρωτότητας από τις μεθοδολογίες HAZUS και Ichii με αυτές που εξάχθηκαν σε δοκιμές για μικρές και μέτριες βλάβες.



Σχήμα 2.70: Σύγκριση Καμπυλών Τρωτότητας για μικρές βλάβες (Δημητρίου, 2008).



Σχήμα 2.71: Σύγκριση Καμπυλών Τρωτότητας για μέτριες βλάβες (Δημητρίου, 2008).

Οι καμπύλες τρωτότητας στα Σχήμα 2.70 -Σχήμα 2.71 για μικρές (minor) και μέτριες (moderate) βλάβες αντίστοιχα σε σύγκριση με τις προτεινόμενες από το HAZUS είναι παρόμοιες, ενώ σε σύγκριση με τις καμπύλες από Ichii έχουν μεγάλες διαφορές (Δημητρίου, 2008).

2.5 Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας (Δ.Κ.Ω.)

Ονομάζονται οι κατασκευές που συμβάλλουν στην καλύτερη λειτουργία μίας κατοικημένης περιοχής. Αποτελούνται από τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης ηλεκτρισμού, φυσικού αερίου, μεταφορών, τηλεπικοινωνιών και άλλων. Οι αστοχίες αυτών μπορούν να δημιουργήσουν τεράστιες επιπτώσεις στον ανθρώπινο πληθυσμό. Τα δίκτυα ονομάζονται «γραμμές ζωής» (Lifelines) και αποτελούνται από γραμμικά (αγωγοί, οδοί) και σημειακά (δεξαμενές, υποσταθμοί) στοιχεία, όπου καλύπτουν μεγάλες περιοχές. Η καλή λειτουργία και συμπεριφορά έπειτα από ένα σεισμό είναι ζωτικής σημασίας.

➤ Δίκτυο Ύδρευσης

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής θεωρεί δεδομένη την παροχή νερού και γενικά της ύδρευσης για την κάλυψη οποιασδήποτε ανάγκης. Στην Ελλάδα εγκαταστάσεις επεξεργασίας σε πηγές υδροληψίας με κεντρικούς σταθμούς άντλησης αναλαμβάνουν την επεξεργασία πόσιμου νερού. Τα συστήματα διανομής διαχωρίζονται σε σωλήνες με διαφορετικά υλικά, τύπους σύνδεσης και διαφορετικές διαμέτρους. Μεγάλα τμήματα του δικτύου ύδρευσης (όπως οι δεξαμενές αποθήκευσης και τα κτίρια των αντλιοστασίων) έχουν κατασκευαστεί με ειδικές μελέτες, διότι είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το δίκτυο ύδρευσης αποτελείται από το σύνολο των κατασκευών μέχρι να γίνει η μεταφορά του νερό από τις Μονάδες Επεξεργασίας Νερού (Μ.Ε.Ν.) στους καταναλωτές. Η συλλογή του γίνεται με ταμιευτήρες και γεωτρήσεις και η μεταφορά πραγματοποιείται με το δίκτυο των αγωγών και των σηράγγων. Το υλικό κατασκευής του δικτύου διανομής αποτελείται από σωλήνες αμιαντοτσιμέντου (Α/Σ), από χαλυβδοσωλήνες, από χυτοσιδήρους είτε πλαστικούς σωλήνες (PVC και πολυαιθυλένιο). Για ασφάλεια, στο δίκτυο είναι εγκατεστημένες δικλείδες (βάνες) απομόνωσης και βάνες ελέγχου πίεσης (Λαγγούσης, κ.α., 2020).

Το δίκτυο παρέχει πόσιμο νερό σε περιοχές με υψόμετρο έως +600m και χωρίζεται σε ζώνες πίεσης. Υπάρχει σύστημα τηλεχειρισμού (SCADA) που παρακολουθεί τη λειτουργία των δικτύων και οι χειρισμοί γίνονται από προσωπικό της ΕΥΔΑΠ είτε των τοπικών ΔΕΥΑ στην επαρχία.

➤ Δίκτυο Αποχέτευσης

Τα δίκτυα αποχέτευσης απαρτίζονται από ένα σύνολο συνιστωσών με σκοπό να γίνει η συγκέντρωση, μεταφορά, επεξεργασία και έγχυση των επεξεργασμένων λυμάτων στους αποδέκτες (Φωτοπούλου, 2007). Παρακάτω γίνεται η διάκριση αυτών που απαρτίζουν το δίκτυο αποχέτευσης:

- οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Ε.Ε.Λ.)
- οι αγωγοί
- οι σήραγγες
- οι βαλβίδες & τα συστήματα αυτόματου ελέγχου (SCADA)

Στην Ελλάδα υπήρξε καθυστέρηση στην κατασκευή σύγχρονων συστημάτων αποχέτευσης. Η Αθήνα διαθέτει ένα από τα παλιότερα ελληνικά παντοροϊκά δίκτυα αποχέτευσης, και στην περιφέρειά τα σύγχρονα χωριστικά δίκτυα, μέχρι την δεκαετία του 1980 το μεγαλύτερο ποσοστό των σπιτιών εξυπηρετούνταν με βόθρους. Ήδη σήμερα στην επαρχία πολλές κατοικίες διαθέτουν τα λύματά τους σε απορροφητικούς είτε στεγανούς βόθρους.

Εν κατακλείδι στην εποχή μας συναντώνται σύγχρονες εγκαταστάσεις υγιεινής σε αστικές και αγροτικές περιοχές, οι οποίες συνέβαλαν στην άνοδο της ποιότητας ζωής. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ρύπανσης αναπτύχθηκαν τεχνολογίες επεξεργασίας και διάθεσης των λυμάτων, οι οποίες όμως απαιτούν την κατασκευή ανάλογων εγκαταστάσεων. Έτσι κάθε δίκτυο συλλογής και μεταφοράς λυμάτων πρέπει να συνδυάζεται με αποτελεσματικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας και με την κατάλληλη διάθεση τους (Σταματάκης, 2012).

2.5.1 Καμπύλες Τρωτότητας Δικτύου Ύδρευσης και Αποχέτευσης

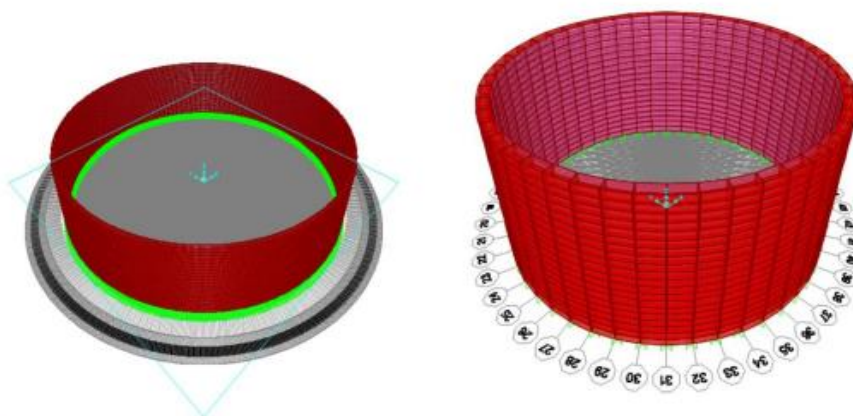
2.5.1.1 Καμπύλες Τρωτότητας σε Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) αποτελούν ένα σύνθετο δίκτυο από κατασκευές με σκοπό την απομάκρυνση ρύπων από τα λύματα πριν την έγχυση τους στο περιβάλλον. Στην περίπτωση σεισμού η ενδεχόμενη αστοχία μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων μπορεί να προκαλέσει εκτός από την απώλεια ανθρωπίνων ζώων και τη διαρροή λυμάτων με απόρροια την περιβαλλοντική ρύπανση (Μαυραγάνης, 2021).

Οι δεξαμενές μίας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων έχει αυξημένη σεισμική τρωτότητα διότι μπορεί να αστοχήσει με διαφορετικούς τρόπους. Συχνές αστοχίες είναι η ανατροπή της δεξαμενής λυμάτων είτε τοπικές αστοχίες. Ερευνητές έχουν καταδείξει τα κρίσιμα στοιχεία δομικής, μη δομικής (Kerpelis, et al., 2021) και λειτουργικής τρωτότητας των δεξαμενών (Kerpelis, et al., 2023). Ποιοτικές προσεγγίσεις έχουν σκοπό την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των δεξαμενών, ως το κυριότερο στοιχείο μιας ΕΕΛ (Kerpelis, et al., 2022).

2.5.1.2 Καμπύλες Τρωτότητας Δεξαμενής Καθίζησης σε Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων

Σκοπός της δεξαμενής καθίζησης είναι ο διαχωρισμός των λυμάτων από τους ρύπους που επιπλέουν στην επιφάνεια. Για την προσομοίωση μίας πρότυπης κυκλικής δεξαμενής με διάμετρο 20m και ύψος 4,45m χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα SAP (Σοκόλη, 2023).



Σχήμα 2.72: Πρότυπα Προσομοιώματα Κυκλικών Δεξαμενών Καθίζησης

Οι δεξαμενές βεβαίως διαφοροποιούνται βάσει του πληθυσμού που θα πρέπει να εξυπηρετηθεί σε μία περιοχή. Για την μοντελοποίηση της δεξαμενής καθίζησης χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 και οι συνθήκες στήριξης ορίστηκαν ως πακτωμένες. Κατηγοριοποιήθηκαν δε σε δεξαμενές με αγκυρωμένα στοιχεία και σε εγκαταστάσεις με μη αγκυρωμένα στοιχεία καθώς και

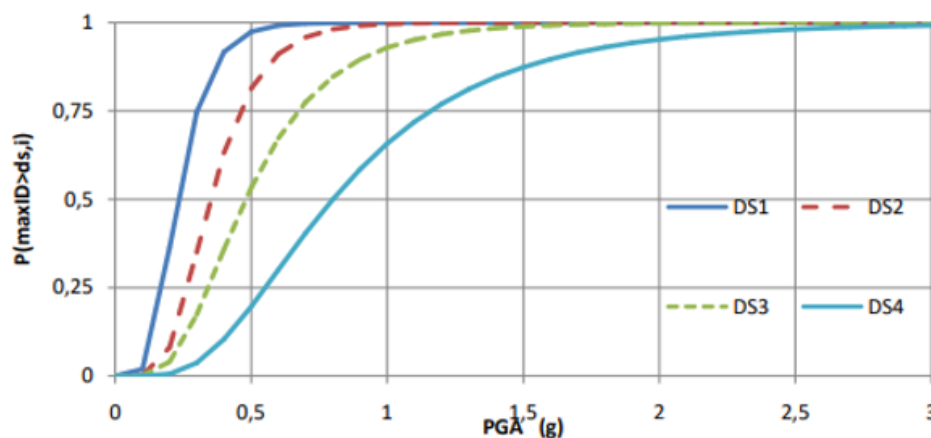
ανάλογα με το μέγεθος τους (σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες). Η διάμετρος τους κυμαινόταν μεταξύ 15–30m.

Στους Πίνακες 2.25-2.27 παρουσιάζονται τα εξαγόμενα της εδαφικής επιτάχυνσης για τις ζημιές σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες δεξαμενές αντίστοιχα, μετά την επιβολή ισχυρών σεισμών στο μοντέλο που δημιουργήθηκε (Σοκόλη , 2023).

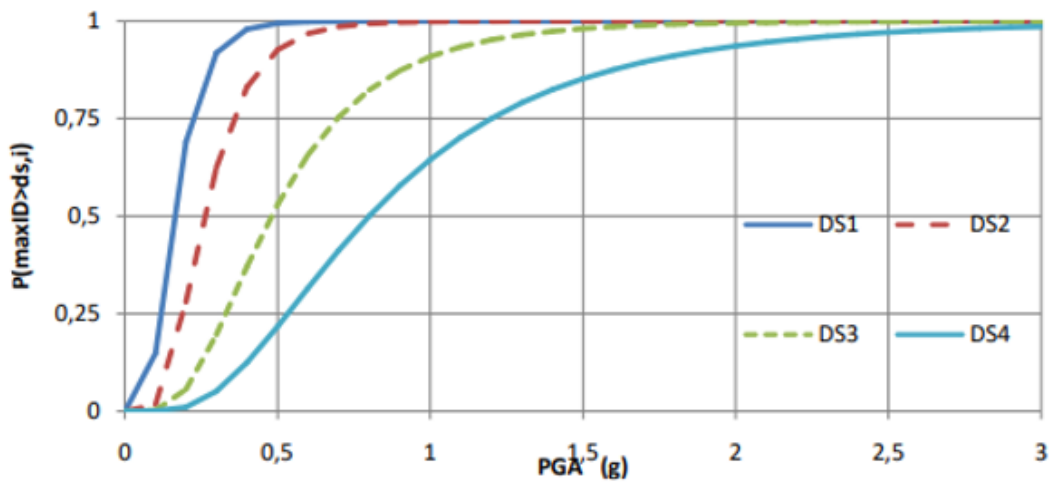
Πίνακας 2.25: Πίνακας Αλγόριθμων Ζημιών σε Μικρές ΕΕΛ (Σοκόλη , 2023).

Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση			
Ταξινόμηση	Κατάσταση Βλάβης	Διάμεσος (g)	Απόκλιση (β)
Εγκαταστάσεις με αγκυρωμένα στοιχεία	Ελαφριά/ Μικρή	0,23	0,40
	Μέτρα	0,35	0,40
	Εκτεταμένη	0,48	0,50
	Πλήρης	0,80	0,55
Εγκαταστάσεις με μη αγκυρωμένα στοιχεία	Ελαφριά/ Μικρή	0,16	0,40
	Μέτρα	0,26	0,40
	Εκτεταμένη	0,48	0,50
	Πλήρης	0,80	0,55

Περαιτέρω, δημιουργήθηκαν καμπύλες τρωτότητας (Σχήμα 2.73 -Σχήμα 2.78) σε όρους πιθανότητας (καμπύλες ευθραυστότητας) και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες καμπύλες τρωτότητας με βάση το HAZUS. Στα Σχήμα 2.73-Σχήμα 2.74 παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας που υπολογίστηκαν για μικρές Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων με αγκυρωμένα και μη στοιχεία αντίστοιχα.



Σχήμα 2.73: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μικρές ΕΕΛ, με αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).

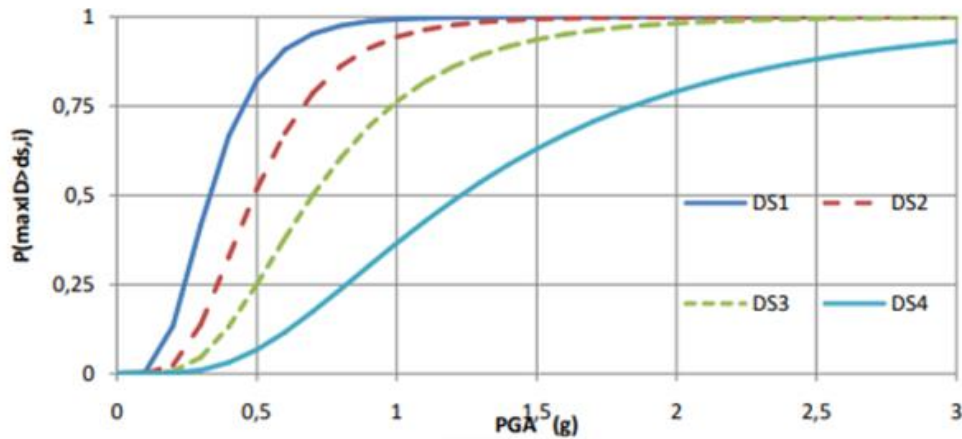


Σχήμα 2.74: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μικρές ΕΕΑ, με μη αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).

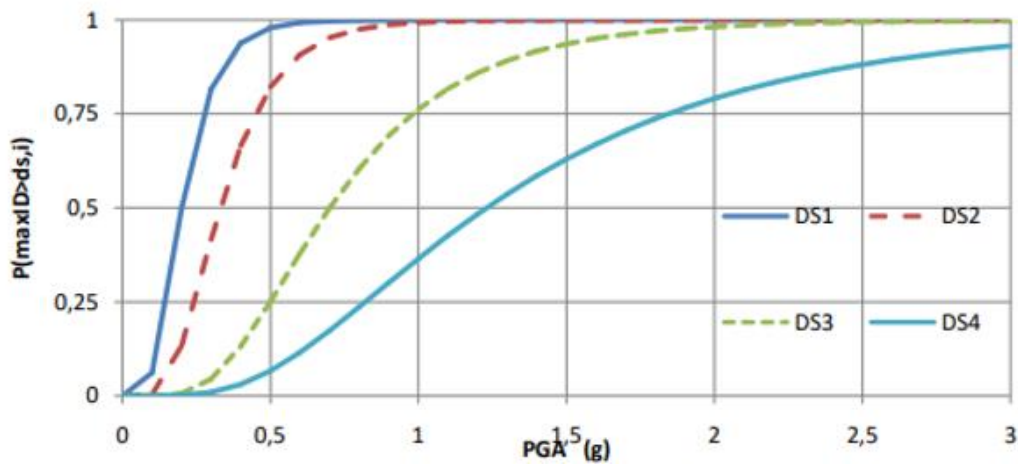
Αντίστοιχα υπολογίσθηκαν οι καμπύλες τρωτότητας για μεσαίες δεξαμενές αγκυρωμένες ή μη (Σχήμα 2.75-Σχήμα 2.76) (Σοκόλη , 2023).

Πίνακας 2.26: Πίνακας Αλγόριθμων Ζημιών για Μεσαίες ΕΕΑ (Σοκόλη , 2023).

Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση			
Ταξινόμηση	Κατάσταση Βλάβης	Διάμεσος g	Απόκλιση β
9Εγκαταστάσεις με αγκυρωμένα στοιχεία	Ελαφριά/ Μικρή	0,33	0,40
	Μέτρα	0,49	0,40
	Εκτεταμένη	0,70	0,45
	Πλήρης	1,23	0,55
Εγκαταστάσεις με μη αγκυρωμένα στοιχεία	Ελαφριά/ Μικρή	0,20	0,40
	Μέτρα	0,33	0,40
	Εκτεταμένη	0,70	0,45
	Πλήρης	1,23	0,55



Σχήμα 2.75: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μεσαίες ΕΕΛ με αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).



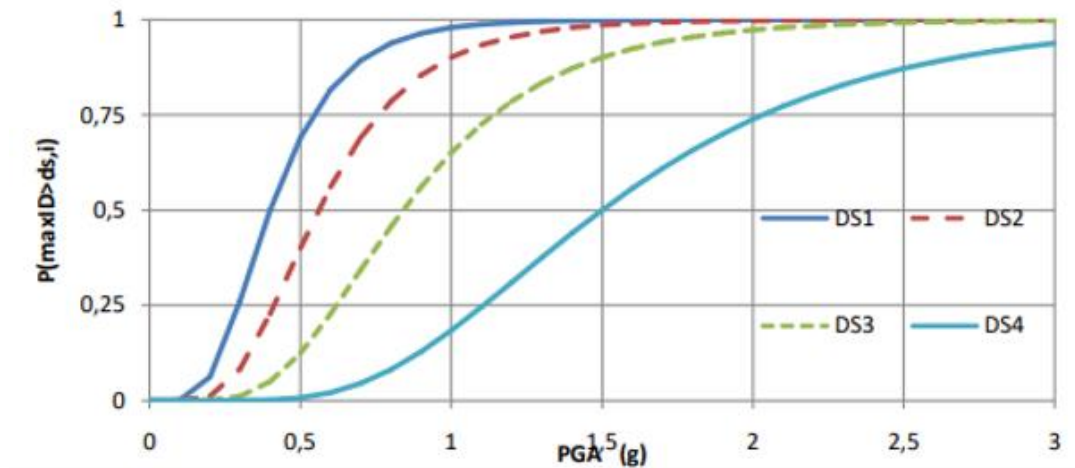
Σχήμα 2.76: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μεσαίες ΕΕΛ, με μη αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).

Αντίστοιχα υπολογίσθηκαν οι καμπύλες τρωτότητας για μεγάλες δεξαμενές αγκυρωμένες ή μη (Σχήμα 2.77-Σχήμα 2.78) (Σοκόλη , 2023).

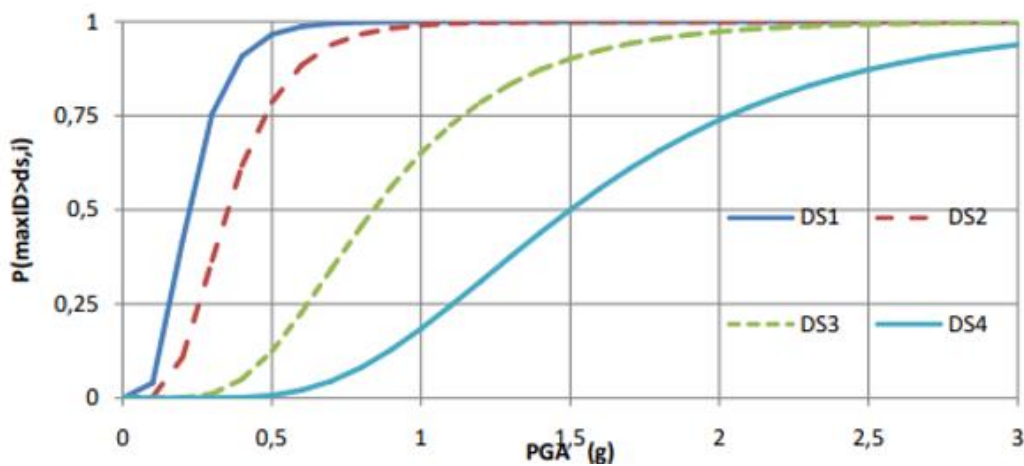
Πίνακας 2.27: Πίνακας Αλγόριθμων Ζημιών για μεγάλες ΕΕΛ (Σοκόλη , 2023).

Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση			
Ταξινόμηση	Κατάσταση Βλάβης	Διάμεσος g	Απόκλιση β
Εγκαταστάσεις με αγκυρωμένα στοιχεία	Ελαφριά/ Μικρή	0,40	0,40
	Μέτρα	0,56	0,40
	Εκτεταμένη	0,84	0,40
	Πλήρης	1,50	0,40

Εγκαταστάσεις με μη αγκυρωμένα στοιχεία	Ελαφριά/ Μικρή	0,22	0,40
	Μέτρα	0,35	0,40
	Εκτεταμένη	0,84	0,40
	Πλήρης	1,50	0,40



Σχήμα 2.77: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μεγάλες ΕΕΛ με αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).



Σχήμα 2.78: Καμπύλη Τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων σε Μεγάλες ΕΕΛ με μη αγκυρωμένα στοιχεία (Σοκόλη , 2023).

Οι καμπύλες τρωτότητας σε όρους πιθανοτήτων για μικρές (Σχήμα 2.73-Σχήμα 2.74), για μεσαίες (Σχήμα 2.75-Σχήμα 2.76) και μεγάλες δεξαμενές (Σχήμα 2.77-Σχήμα 2.78), αποδεικνύουν ότι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης στις περιπτώσεις των μη αγκυρωμένων δεξαμενών των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων και για τα τρία διαφορετικά μεγέθη δεξαμενών.

Οι καμπύλες τρωτότητας για τις δεξαμενές των ΕΕΛ κατά HAZUS, προκύπτουν με βάση τα αμερικανικά δεδομένα. Στην Ελλάδα υπάρχουν διαφορές ως προς τα δεδομένα και τη χρήση των οπλισμών και των κατηγοριών σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε μία απόκλιση της τάξεως του 10% στις προαναφερθείσες καμπύλες τρωτότητας με βάση τη μοντελοποίηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης με τις καμπύλες τρωτότητας HAZUS, με συνέπεια να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αξιόπιστα οι καμπύλες HAZUS (Σοκόλη, 2023).

2.5.2 Καμπύλες Τρωτότητας Αγωγών

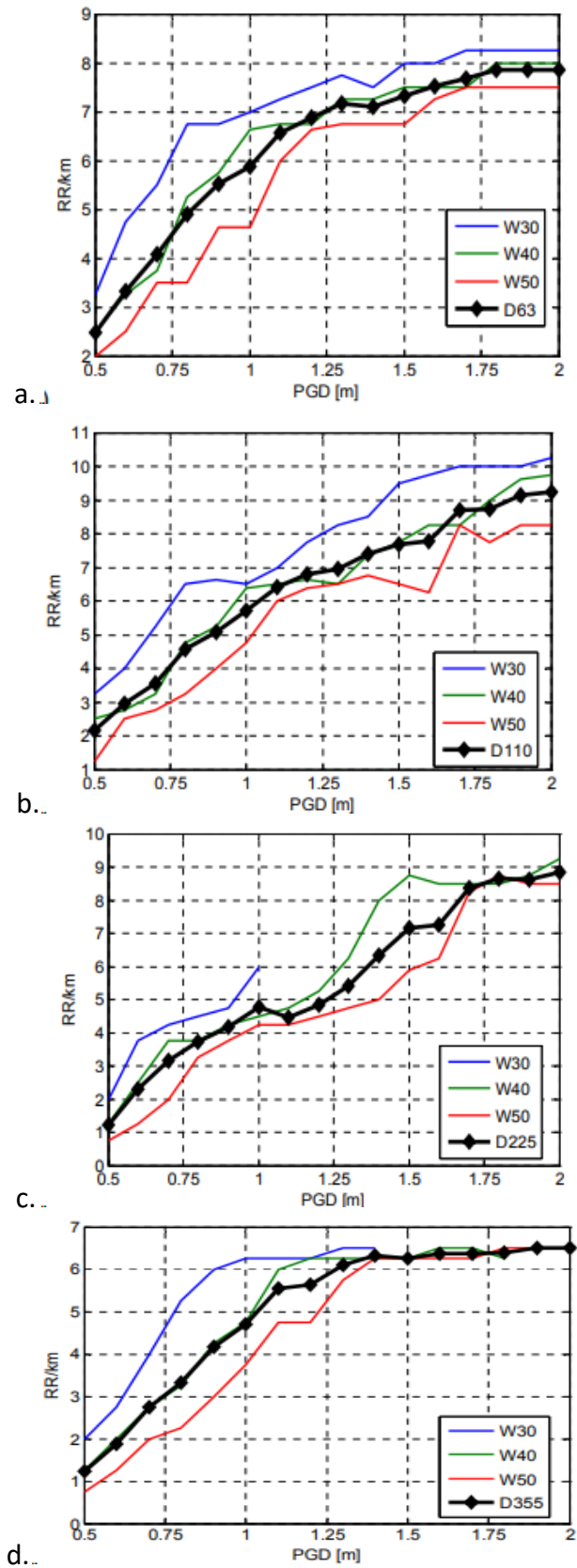
Το υλικό των αγωγών αποχέτευσης είναι PVC και HDPE. Οι καμπύλες τρωτότητας εκφράζουν τον αριθμό των αστοχιών ανά χιλιόμετρο μήκους αγωγού (RR/km) για διάφορα μεγέθη εδαφικής μετακίνησης (Τερζή, κ.α., 2008).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας για τις περιπτώσεις υλικών PVC και HDPE, που έχουν προκύψει με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συναρτήσεως του πλήθους των επεμβάσεων ανά χιλιόμετρο σε σχέση με την εδαφική επιτάχυνση. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.28. Για κάθε υλικό αγωγού αντιστοιχούν τέσσερα σχήματα που αντιστοιχούν σε τέσσερις διαφορετικές τιμές διαμέτρων αγωγών. Οι καμπύλες με μπλε, πράσινο και κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν σε μήκη (W) ίσα με 30, 40 και 50m ζώνης εδαφικής μετακίνησης αντίστοιχα. Η καμπύλη με μαύρο χρώμα αντιστοιχεί στην μέση καμπύλη τρωτότητας. Με την αύξηση του μήκους ζώνης των μόνιμων μετακινήσεων μειώνονται οι αστοχίες. Για την ίδια μετακίνηση το μικρό μήκος φόρτισης προκαλεί συγκέντρωση τάσεων σε μικρότερο μήκος αγωγού με απόρροια την εμφάνιση περισσότερων αστοχιών σε σύγκριση με μεγαλύτερο μήκος φόρτισης.

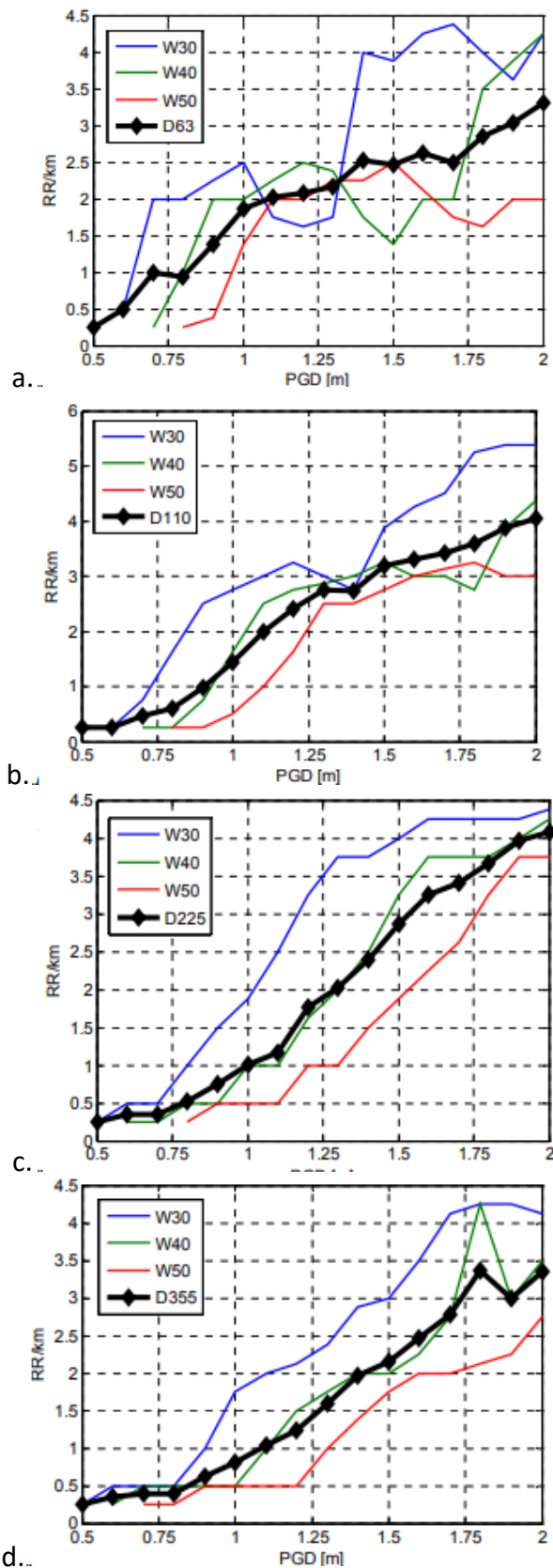
Πίνακας 2.28: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση αγωγών (Τερζή, κ.α., 2008).

Περίπτωση	Διάμετρος αγωγού D (mm)	Πάχος τοιχώματος αγωγού (mm)
1	63	2.3
2	110	3.8
3	225	7.5
4	355	11.5

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας για τους αγωγούς PVC (Σχήμα 2.79) και για τους αγωγούς HDPE (Σχήμα 2.80).

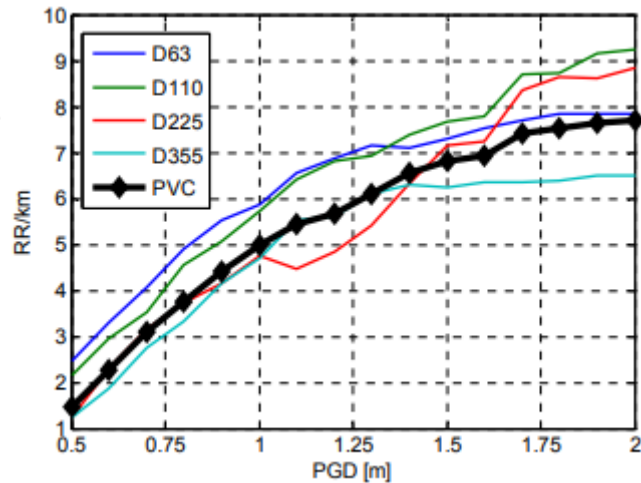


Σχήμα 2.79: Καμπύλες τρωτότητας αγωγών PVC, για διάφορες διαμέτρους (Τερζή, κ.α., 2008).

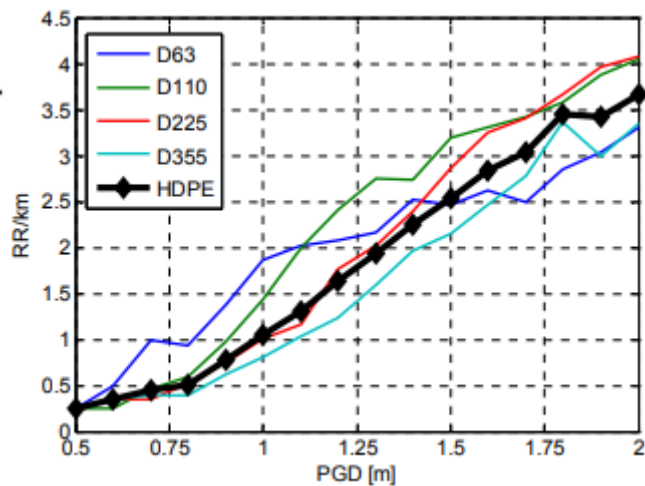


Σχήμα 2.80: Καμπύλες Τρωτότητας αγωγών HDPE, για διάφορες διαμέτρους (Τερζή, κ.α., 2008).

Βάσει των παραπάνω καμπυλών τρωτότητας για αγωγούς PVC και HDPE, προκύπτουν οι μέσες καμπύλες τρωτότητας όπως φαίνεται παρακάτω στα Σχήμα 2.82 -Σχήμα 2.83.



Σχήμα 2.81: Μέσες καμπύλες τρωτότητας αγωγών PVC (Τερζή, κ.α., 2008).



Σχήμα 2.82: Μέσες καμπύλες τρωτότητας αγωγών HDPE (Τερζή, κ.α., 2008).

Οι αστοχίες που αντιστοιχούν στον αγωγό με υλικό από PVC είναι μεγαλύτερες από αυτές του αγωγού HDPE για την ίδια εδαφική μετακίνηση. Οι διαφοροποιήσεις οφείλονται στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, διότι η διάμετρος, τα μήκη ζωνών, η κατανομή και το μέγεθος φόρτισης διατηρούνται σταθερά.

Προτείνεται από ερευνητές ο υπολογισμός των μόνιμων μετακινήσεων για τον υπολογισμό καμπυλών τρωτότητας σε αγωγούς (Honegger & Eguchi, 1992). Αυτό πραγματοποιείται με βάση τη σχέση:

$$R.R./km = K * (7,821 * PGD^{0,56})$$

Όπου,

- R.R./km είναι ο αριθμός επεμβάσεων ανά χιλιόμετρο
- PGD είναι η μέγιστη εδαφική μετακίνηση
- K είναι ο συντελεστής υλικού αγωγού (K=0,3 σε αγωγούς PVC, χαλύβδινους και K=1 σε ψαθυρούς)

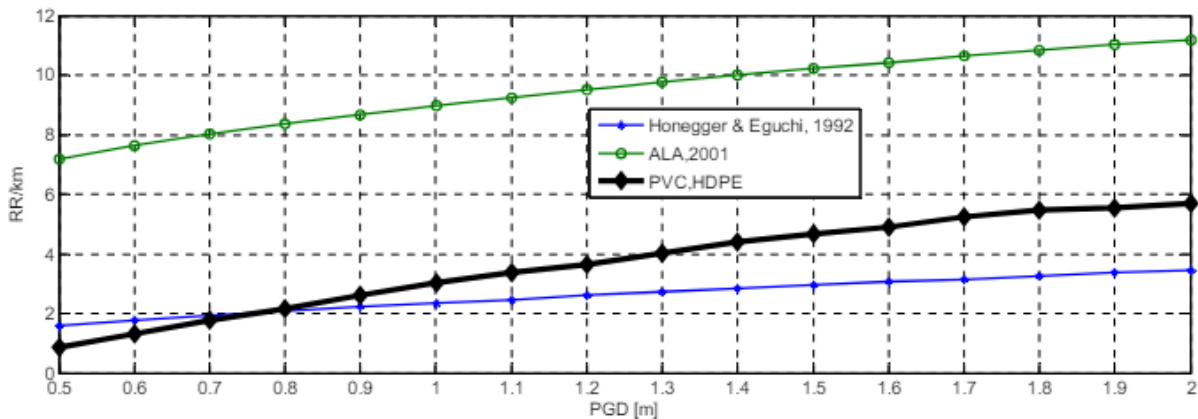
Επίσης βάσει ALA (2001) προτείνεται η σχέση:

$$R.R./km = K2 * (11.221 * PGD^{0.56}),$$

Όπου K2 είναι ένας συντελεστής, ο οποίος εξαρτάται από το υλικό του αγωγού.

Στην περίπτωση εύκαμπτων αγωγών ο συντελεστής K2 είναι 0,8.

Στο Σχήμα 2.83 υπολογίσθηκαν οι καμπύλες τρωτότητας εύκαμπτων αγωγών.



Σχήμα 2.83: Συγκριτική απεικόνιση καμπυλών τρωτότητας εύκαμπτων αγωγών (Τερζή, κ.α., 2008).

Μετά την επίλυση μοντέλων με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρατηρείται ότι η καμπύλη τρωτότητας εύκαμπτων αγωγών βάσει αυτής της μεθόδου προσεγγίζει αξιόπιστα την μέθοδο Honnegger & Eguchi (1992). Ο αριθμός των αστοχιών είναι μικρότερος από τις αντίστοιχες της εμπειρικής καμπύλης. Η αύξηση του μεγέθους της εδαφικής μετακίνησης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των αστοχιών (Τερζή, κ.α., 2008).

2.5.3 Καμπύλες Τρωτότητας Χαλύβδινου Αγωγού

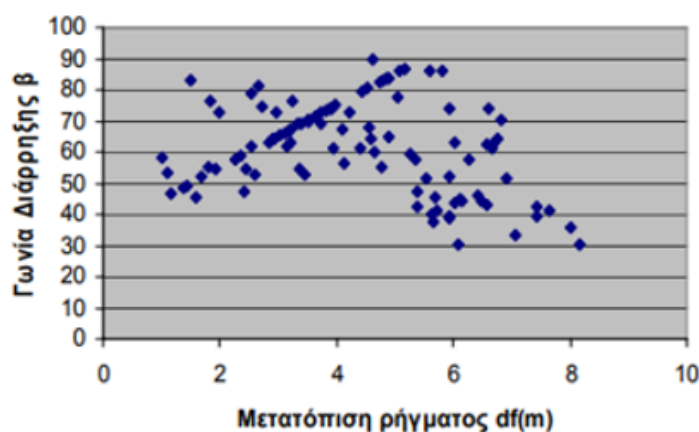
Με το λογισμικό SSF έγιναν αριθμητικές επιλύσεις κατασκευασμένων υπόγειων αγωγών από χάλυβα κατά την μετατόπιση ενός ρήγματος. Οι παράμετροι συμπεριφοράς του αγωγού διατηρούνται σταθεροί και γίνονται αλλαγές στην παράμετρο επίδρασης (Ρούμπα, 2009).

A) ΔΟΚΙΜΗ 1:

Χρησιμοποιήθηκε αγωγός από χάλυβα X-52, με δεδομένα χαρακτηριστικά την διάμετρο $D=0,60m$, το πάχος τοιχώματος $t=0,0064m$, το έδαφος ως αμμώδες και το βάθος τοποθέτησης του στα $1,15m$. Επίσης η μετατόπιση που επιβάλλει το υπό εξέταση ρήγμα ίσο με $2,5m$ και γωνία διάρρηξης 60° .

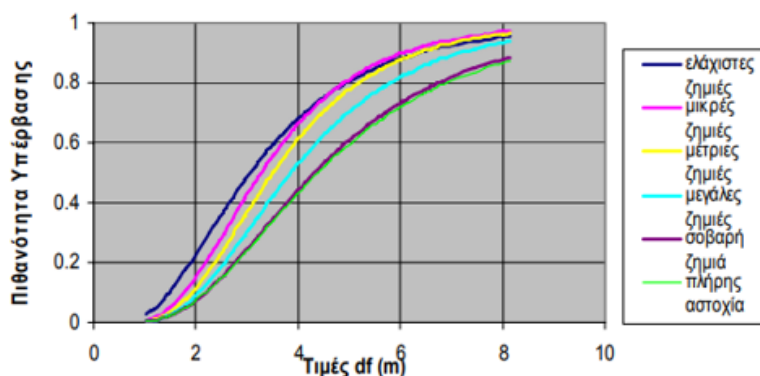
Δημιουργήθηκαν τυχαία ζεύγη τιμών μετατοπίσεων ρήγματος (df) με τις γωνίες διάρρηξης, ώστε να συμπεριλαμβάνονται περισσότερες εκδοχές για τα σεισμικά αποτελέσματα διαφόρων περιπτώσεων (Σχήμα 2.84).

Η γωνία διάρρηξης του ρήματος είναι η γωνία με την οποία το ρήγμα περνάει την σωλήνωση.



Σχήμα 2.84: Δεδομένα Προγράμματος

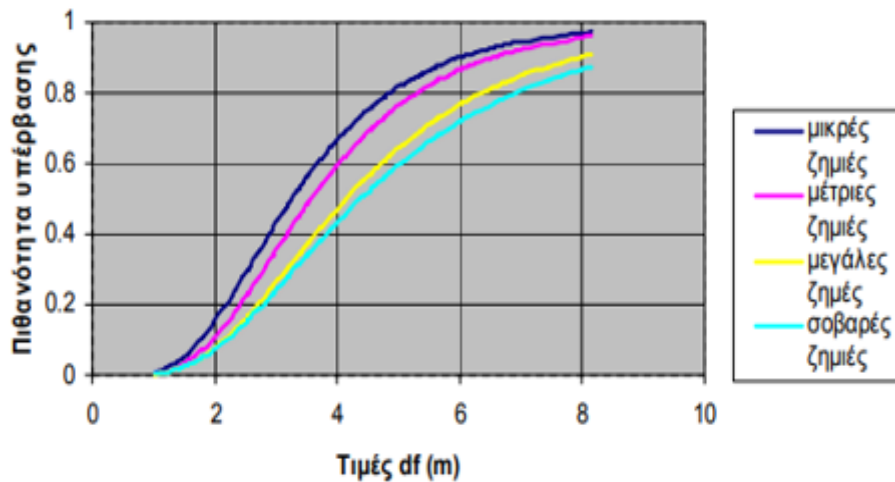
Από τις καμπύλες τρωτότητας που προκύπτουν από την αριθμητική επεξεργασία των αποτελεσμάτων του προγράμματος SSF (Σχήμα 2.85). Παρατηρείται πως οι καμπύλες τρωτότητας με τις λιγότερες ζημιές που υπάρχει περίπτωση να συμβούν, είναι αυτές για πολύ μικρές μετατοπίσεις του ρήγματος. Επίσης η πιθανότητα για σοβαρή ζημιά με ποσοστό περίπου 85% είναι ισοδύναμη με την πιθανότητα της πλήρης αστοχίας του αγωγού.



Σχήμα 2.85: Καμπύλες Τρωτότητας (υλικού αγωγού X-52) (Ρούμπα, 2009).

B) ΔΟΚΙΜΗ 2:

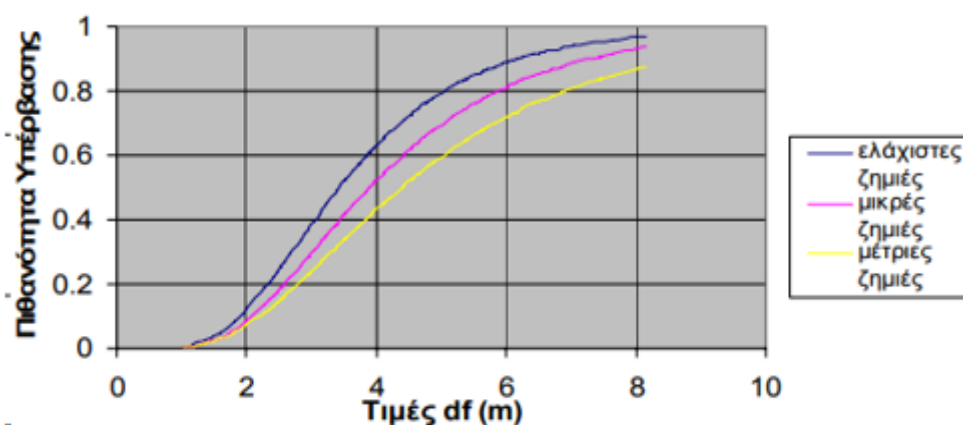
Εξετάζοντας αγωγό με χαμηλότερη αντοχή όπως X-42, διατηρώντας τα χαρακτηριστικά του εδάφους ως αμμώδες, προκύπτουν οι καμπύλες τρωτότητας (Σχήμα 2.86). Παρατηρείται πως ο αγωγός είναι εύθραυστος και σε περίπτωση σεισμικού φαινομένου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης ζημιάς με ποσοστό άνω του 90%.



Σχήμα 2.86: Καμπύλες Τρωτότητας (υλικού αγωγού X-42) (Ρούμπα, 2009).

Γ) ΔΟΚΙΜΗ 3:

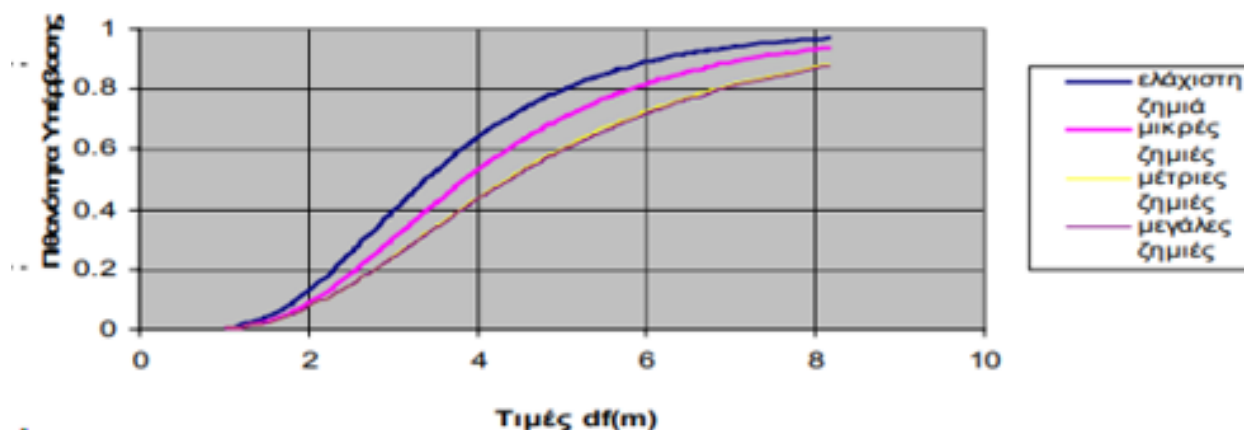
Ο αγωγός της Δοκιμής 1 με υλικό X-52 με μεγαλύτερη διάμετρο ίση με $D=95m$ και πάχος τοιχώματος $t=0.0217$ και βάθος εκσκαφής 2,09m, δίνει καμπύλες τρωτότητας στο Σχήμα 2.87, σύμφωνα με τις οποίες δεν έρχεται σε πλήρη αστοχία, ούτε εμφανίζει σοβαρές βλάβες. Σε πλήρη αστοχία μπορεί να φτάσει με μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης ο αγωγός με την μικρότερη διάμετρο.



Σχήμα 2.87: Καμπύλες Τρωτότητας Αγωγού X-52 (λόγω επίδρασης διαμέτρου αγωγού) (Ρούμπα, 2009).

Δ) ΔΟΚΙΜΗ 4:

Με την αλλαγή του εδάφους από αμμώδες σε ελαφρόπετρα και βάθος τοποθέτησης 1,30m, παρατηρούμε ότι ο αγωγός έχει καλύτερη συμπεριφορά από το Σχήμα 81, σε σχέση με τις καμπύλες τρωτότητας σε αμμώδες έδαφος που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.87. Οι βλάβες στις οποίες μπορεί να επέλθει ο αγωγός είναι μέχρι μέτριες, αντίθετα με τις βλάβες σε άμμο που μπορούν να φτάσουν μέχρι και πλήρη αστοχία.



Σχήμα 2.88:: Καμπύλες τρωτότητας Αγωγών (λόγω αλλαγής εδάφους) (Ρούμπα, 2009).

ΜΕΡΟΣ Γ:

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια ανάδειξης της σημασίας της τρωτότητας και κατ' επέκταση της σεισμικής διακινδύνευσης. Δίνεται όλο το απαραίτητο υπόβαθρο για την εκτίμηση των καμπυλών τρωτότητας για διάφορους τύπους κατασκευών που συναντώνται καθημερινά σε μία κοινωνία και παίζουν καθοριστικό ρόλο στη σωστή λειτουργία της.

Αναφέρθηκαν και αναλύθηκαν μέθοδοι εκτίμησης καθώς και τρόποι υπολογισμού των καμπυλών τρωτότητας, μέσω των οποίων εκφράζεται η πιθανότητα μια κατασκευή να εμφανίσει βλάβες όταν υπόκειται σε ένα σεισμικό γεγονός. Η περιγραφή των βλαβών γίνεται με τον ορισμό τεσσάρων επιπέδων βλάβης, για μικρές, μέτριες, εκτεταμένες και υπό κατάρρευση βλάβες.

Οι περιπτώσεις καμπυλών τρωτότητας που καταγράφηκαν μέσω της βιβλιογραφίας είναι α) των κτιρίων από Ο/Σ, μεταλλικές, φέρουσας τοιχοποιίας, β) των συγκοινωνιακών δικτύων που περιλαμβάνουν γέφυρες, σήραγγες, οδούς και τοίχους αντιστήριξης, γ) των λιμενικών έργων για κρηπιδότοιχους και τέλος δ) των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης για εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και αγωγών. Παρακάτω γίνεται μία σύνοψη όλων των αποτελεσμάτων από ερευνητές οι οποίοι μελέτησαν τις ανωτέρω περιπτώσεις κατασκευών και παρουσιάζονται στην εν λόγω διπλωματική εργασία.

Για τα κτίρια από Ο/Σ επιλέχθηκαν υβριδικές καμπύλες τρωτότητας σε όρους πιθανότητας, για κτίρια με μεγάλο ύψος. Γίνεται η σύγκριση των κτιρίων με τοιχοπληρώσεις σε όλους τους ορόφους, χωρίς τοιχοπληρώσεις στο ισόγειο (με τη δημιουργία πιλοτής) καθώς και σε μικτά τοιχοπληρωμένα συστήματα, σχεδιασμένα με το ΒΔ '59 και με ΕΑΚ 2000. Παρατηρήθηκε ότι η πιθανότητα βλάβης για τα κτίρια με το ΒΔ '59 είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτά που είναι σχεδιασμένα με ΕΑΚ2000. Στη συνέχεια εξάχθηκαν καμπύλες τρωτότητας για εξώροφο κτίριο το οποίο ελέγχεται σε διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση σεισμού, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης μίας στάθμης επιτελεστικότητας υφίσταται κατά την διαμήκη διεύθυνση (X). Αναλύθηκαν μεταλλικές κατασκευές, οι οποίες προσομοιώθηκαν με δύο πλαίσια, ένα πλαίσιο με συνδέσμους και ένα χωρίς (ως πλαίσιο ροπών). Εξετάστηκαν σε συνθήκες πλήρης πάκτωσης και σε συνθήκες μη γραμμικών ελατηρίων, για διάφορες δυσκαμψίες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και οι δύο τύποι πλαισίων έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες εμφάνισης βλάβης σε μαλακά εδάφη, δηλαδή σε εδάφη με μικρή δυσκαμψία και σε συνθήκες ενδόσιμης θεμελίωσης (γραμμικών ελατηρίων). Εξετάστηκε επίσης η μελέτη για μία περίπτωση υφιστάμενου κτιρίου από φέρουσα τοιχοποιία με μαλακό τοπικό ασβεστόλιθο και για τους 3 τύπους εμφάνισης βλάβης, με την κανονική και λογαριθμική κατανομή.

Περαιτέρω, διερευνήθηκαν καμπύλες τρωτότητας σε συγκοινωνιακά και λιμενικά δίκτυα. Εξετάστηκαν μελέτες περίπτωσης από τη βιβλιογραφία. Αρχικά παρουσιάστηκαν οι γέφυρες της Κρυσταλλοπηγής και του ποταμού Λίσσου, οι οποίες μελετήθηκαν στην εγκάρσια και στη διαμήκη διεύθυνση. Διαπιστώνεται μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης κατά την διαμήκη διεύθυνση (X) και στις δύο περιπτώσεις γεφυρών, ενώ η πιθανότητα υπέρβασης της τελευταίας στάθμης βλάβης, δηλαδή της περίπτωσης κατάρρευσης να είναι περίπου ίδια και στις δύο διευθύνσεις.

Έπειτα δόθηκαν οι καμπύλες τρωτότητας σε σήραγγες μικρού βάθους για δύο τυπικές διατομές, μία ορθογωνική και μία κυκλική, όπου εξετάστηκαν τα εδάφη κατηγορίας Β και C. Οι καμπύλες τρωτότητας ανέδειξαν μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης και για τις δύο διατομές για τον εδαφικό τύπο C, ενώ για έδαφος Β οι βλάβες είναι μικρότερες. Όμως, η πιθανότητα δημιουργίας μικρών βλαβών είναι περίπου ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Επίσης εξετάστηκαν οι σήραγγες ολομέτωπης διάνοιξης με τη μέθοδο «cut & cover» μέσω της μεθοδολογίας HAZUS σε όρους πιθανότητας συναρτήσει της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης και μόνιμης εδαφικής μετακίνησης.

Για έργα οδοποιίας μελετήθηκαν καμπύλες τρωτότητας σε τυπική διατομή επιχώματος οδοποιίας για κανονικό, ανάστροφο και αγνώστου τύπου ρήγμα. Μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης εμφανίζεται για διάρρηξη κανονικού ρήγματος, ενώ μικρότερη στην περίπτωση ανάστροφου ρήγματος, ιδιαίτερα στην περίπτωση εμφάνισης εκτεταμένων βλαβών. Για αγνώστου τύπου ρήγμα οι πιθανότητες έχουν ενδιάμεσες πιθανότητες.

Η τελευταία μελέτη καμπυλών τρωτότητας για τα συγκοινωνιακά δίκτυα η οποία μελετήθηκε αφορούσε τοίχο αντιστήριξης με πέδιλο, όπου στη βάση του το έδαφος είναι βράχος. Εξετάζεται σε τρία (3) διαφορετικά ύψη του τοίχου, σε διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση και σε συνάρτηση της εδαφικής επιτάχυνσης, μετακίνησης και αθροιστικής απόλυτης ταχύτητας. Προκύπτει δε μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης για διαμήκη διεύθυνση ιδιαίτερα στους τοίχους αντιστήριξης με μεγάλο ύψος. Αντίθετα στην εγκάρσια διεύθυνση μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης παρουσιάζουν οι τοίχοι με μικρότερο ύψος.

Για τις λιμενικές εγκαταστάσεις εξετάστηκε κρηπιδοτόιχος βαρύτητας τεσσάρων διαφορετικών διαστάσεων για μικρές και μέτριες βλάβες και συγκρίνονται οι εμπειρικές καμπύλες από HAZUS και από τον ερευνητή Ichii. Η προτεινόμενη καμπύλη κατά HAZUS δίνει πιθανότητες εμφάνισης βλάβης παρόμοιες με αυτές που προέκυψαν, ενώ οι καμπύλες κατά Ichii έχουν μεγάλες αποκλίσεις.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε αναφορά στην διερεύνηση καμπυλών τρωτότητας του δικτύου ύδρευσης και αποχέτευσης, με βάση βασικές συνιστώσες τους. Αρχικά παρουσιάστηκαν καμπύλες τρωτότητας σε δεξαμενές οπλισμένου σκυροδέματος (μικρές, μεσαίες, μεγάλες) για αγκυρωμένα και μη στοιχεία που αποτελούν βασική κατασκευή των εγκαταστάσεων ύδρευσης είτε επεξεργασίας λυμάτων. Τα αποτελέσματα δίνουν μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης για τα μη αγκυρωμένα στοιχεία και για τα τρία διαφορετικά μεγέθη δεξαμενών. Έπειτα εξετάστηκαν οι αγωγοί με υλικά PVC και HDPE για διάφορα μήκη εδαφικής μετακίνησης. Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του μήκους της εδαφικής μετακίνησης μειώνονται οι αστοχίες και στα δύο υλικά. Συγκριτικά, μεγαλύτερες αστοχίες παρουσιάζονται στον αγωγό από PVC. Μελετήθηκαν επίσης χαλύβδινοι αγωγοί στους οποίους έγιναν δοκιμές αλλάζοντας την ποιότητα του αγωγού με χαμηλότερης αντοχής υλικό. Προέκυψε ότι ο αγωγός χαμηλότερης ποιότητας είναι πιο εύθραυστος της τάξεως του 90% από τον αγωγό με καλύτερη ποιότητα. Αυξάνοντας επίσης το πάχος τοιχώματος του αγωγού δίνονται καμπύλες τρωτότητας όπου το υλικό δεν φτάνει την πιθανότητα αστοχίας για σοβαρές βλάβες,

Στην Ελλάδα, οι μελέτες για την σεισμική τρωτότητα βρίσκονται σε πολύ αρχικό στάδιο. Μέσω αυτών μπορούν να προβλεφθούν πιθανές βλάβες, ώστε να πραγματοποιηθεί η άμεση αποκατάστασή τους. Η πρόβλεψη είναι απαραίτητη, λαμβάνοντας υπόψη τη σεισμικότητα των περιοχών και

απαιτείται η θέσπιση μίας αξιόπιστης λύσης για την αποτίμηση της τρωτότητας των κτιρίων και των δικτύων κοινής ωφελείας έναντι σεισμού.

Αποτέλεσμα της σωστής εκτίμησης της συμπεριφοράς των κατασκευών θα έχει ως επακόλουθο τις προτάσεις των απαραίτητων μέτρων για το μετριασμό της σεισμικής διακινδύνευσης των κατασκευών και των δικτύων συνολικότερα. Η χρησιμοποίηση των καμπυλών τρωτότητας σε κατασκευές (αναλόγως της κατηγορίας τους) δίνει τη βάση για την ανάπτυξη νέων και την βελτίωση των υφιστάμενων καμπυλών, ώστε να εφαρμόζονται επικαιροποιημένες σε πραγματικές κατασκευές με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

4. Βιβλιογραφία

- ALA. (2001). Seismic Fragility Formulations For Water System, American Lifelines Alliance Part 1. Ανάκτηση από www.americanlifelinesalliance.org
- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., & Bommer, J. (2006). Development of seismic vulnerability assesment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology* 43.
- CEN. (2004). EN1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC).
- HAZUS. (2020). Hazus Earthquake Model, Technical Manual, FEMA. Ανάκτηση από https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-10/fema_hazus_earthquake_technical_manual_4-2.pdf
- Honegger , D. G., & Eguchi, R. (1992). Determination of the Relative Vulnerabilities to Seismic Damage for Dan Diego Country Watrer Authority (SDCWA) Watrer Transmission Pipelines.
- Ichii. (2003). Application of Performance - Based Seismic Design Concept for Caisson - Type Quay Walls.
- Ichii, K. (2004). Fragility Curves for Gravity - Type QQuay Walls Based on Effective Stress Analysis. Vancouver, BC Canada.
- Kappos, A., Penelis, G., & Panagiotopoulos, C. (2006). A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Article in Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Kassem, M., Nazri , M., & Farsangi, N. (2020). The seismic vulnerability assesment methodologies: A state of art review. *Ain Ashams Engineering Journal*, 11(4). σσ. 849-864.
- Kerpelis , P., Alexakis, D., & Golfinopoulos , S. (2022). A Qualitative Approach of the Seismic Estimation of the Wastewater Treatment Plants and Potential Impacts on the Hydrosphere: Diagnosis, Monitoring, Assessment, Water, vol 14. σ. 3225. Ανάκτηση από <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/20/3225>
- Kerpelis, P. N., Golfinopoulos, S. K., & Alexakis, D. E. (2021). A Proposal Theoretical Approach for the Estimation of Seismic Structural Vulnerability of Wastewater Threatment Plants. Sustainability, Special Issue "Natural and Technological Hazards in Urban Areas: Assessment, Planning and Solutions". σσ. Vol. 13, issue 9, 4835, MDPI. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.3390/su13094835>
- Kerpelis, P., Golfinopoulos, S., & Alexakis, D. (2023). Non-Structural and Operational Parameters for the Estimation of Seismic Vulnerability of Wastewater Treatment Plants. *International Journal of Environmental Science and Technology Springer*.

- Kyriakidis, N., Pilakoutas, K., & Chrysostomou, C. Z. (2007). Vulnerability og RC buildings and risk assesment for Cyprus.
- NIBS. (2004). Direct physical damage - general building stock. Hazus- MH Technical manual, Chapter 5. Federal Emergency Management Agency. *National Institute of Building Sciences (NIBS)*. Washington, D.C.
- Petridis, C., & Pitilakis , D. (2019). Σεισμική Τρωτότητα κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος με συνεκτίμηση δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής. *4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας* . Αθήνα .
- Αλεξούδη, Μ., Ρήγα, Ε.-Ε., & Πιτιλάκης, Κ. (2008). Διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων ύδρευσης. Η περίπτωση του Δήμου Θεσσαλονίκης. *3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου*.
- Αργυρούδη, Σ. Α. (2010). *Συμβολή στη Σεισμική Τρωτότητα και Διακινδύνευση Συγκοινωνιακών Δικτύων σε Αστικό Περιβάλλον*. Θεσσαλονίκη.
- Αργυρουδης, Σ., & Πιτιλάκης , Κ. (2008). Αριθμητικές Καμπύλες Τρωτότητας Σηράγγων Μικρού Βάθους υπό Εγκάρσια Σεισμική Φόρτιση.
- Δημητρίου, Ι. (2008). Μελέτη Σεισμικής Απόκρισης Κρητιδότοιχων Βαρύτητας και Πρόταση Καμπυλών Τρωτότητας με Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων. Θεσσαλονίκη.
- Εμμανουηλίδου, Π. (2019). Ανθεκτικότητα έργων υποδομής στον τομέα της ενέργειας έναντι φυσικών πόρων . Κοζάνη.
- Κακαλέτρης, Ι. Λ. (2024). Αποτίμηση Υφιστάμενου Εξαώροφο Κτιρίου από Ω.Σ. με Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση και Καμπύλες Τρωτότητας. Αθήνα.
- Κάππος. (2012). Εκτίμηση Τρωτότητας Κτιριακών Κατασκευών.
- Κάππος, Α. Ι., & Παναγόπουλος, Γ. (2006). Υπολογισμός καμπυλών τρωτότητας για κτίρια από Ο/Σ.
- Κάππος, Α., Μοσχονάς, Ι., Παρασκευά , Θ., & Σέξτος, Α. (2006). Αναλυτική Μεθοδολογία Υπολογισμού Καμπυλών Τρωτότητας Γεφυρών. *15ο Συνέδριο Σκυροδέματος*. Αλεξανδρούπολη.
- Καράογλου, Δ. Ι. (2016). Προσομοίωση και Εκτίμηση Σεισμικής Συμπεριφοράς Δεξαμενών με Πλωτή Οροφή . Αθήνα.
- Κέρπελης, Π. (2023). Εκτίμηση - κατάταξη της σεισμικής τρωτότητας των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων και διερεύνηση της ως προς τη ρύπανση εδαφικών και υδάτινων πόρων, PhD thesis . Πανεπιστήμιο Αιγαίου .
- Κουτσουπάκη, Ε., Σωτηριάδης, Δ., Πεταλά , Ε., Μπαντραλέξης, Κ., Δόκας, Ι., & Κλήμης, Ν. (2023). Εκτίμηση της Σεισμικής Τρωτότητας Τοίχων Αντιστήριξης κατά μήκος του Οδικού Δικτύου της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. *9ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής*.

- Λαγγούσης, Α. Σ., & Φουρνιώτης, Ν. Θ. (2020). *Στοιχεία Σχεδιασμού Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης*. GOTSIS.
- Μαυραγάνης, Α. (2021). Σεισμική Τρωτότητα Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων - Η περίπτωση της Ψυττάλειας. Αθήνα.
- Μπάρλα, Ν. (2004). *Υπολογισμός καμπυλών Τρωτότητας γεφυρών με τη μέθοδο της Υπερωθητικής Δυναμικής Ανάλυσης*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Πολιτικών Μηχανικών, Βόλος.
- N1154B. (2003). Τροποποίηση του "Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-2000" λόγω αναθεώρησης του Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας. *Εφημερίς της Κυβερνήσεως*.
- Παπαρινούδη, Μ. (2020). Σεισμική Διακινδύνευση αστικών κέντρων: Ανάπτυξη μοντέλου στοιχείων υπό διακινδύνευση για το κτιριακό απόθεμα της πόλης της Κοζάνης -Εκτίμηση σεισμικής διακινδύνευσης με χρήση του λογισμικού OpenQuake engine. . Θεσσαλονίκη.
- Παππάς, Ε. (2020). Εκτίμηση Σεισμικού Κινδύνου και υπολογισμός απωλειών στα Δίκτυα Ζωής. Πάτρα.
- Πεταλά, Ε., Κλήμης, Ν., Σωτηριάδης, Δ., Κουτσουπάκη, Ε.-Ι., Μπαντραλέξης, Κ., & Δόκας, Ι. (2023). Καμπύλες Τρωτότητας επιχωμάτων οδοποιίας λόγω διάδοσης της διάρρηξης υποκείμενων σεισμικών ρηγμάτων. *9ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής*. Αθήνα.
- Πολυχρονίου, Ε. Κ. (2011). Εκτίμηση Σεισμικής Τρωτότητας Κατασκευής από Φέρουσα Τοιχοποιία και Προτεινόμενες Ενισχύσεις με ανάπτυξη της μεθοδολογίας των καμπυλών θραυστότητας. Αθήνα. doi:<http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.1421>
- Ρούμπα, Δ. (2009). Σεισμική Τρωτότητα Δικτύων Κοινής Ωφέλειας. 146. Ανάκτηση από <http://purl.tuc.gr/dl/dias/53CCA67D-4E50-43E2-953B-B4AD85B01B4F>
- Σοκόλη, Α. (2023). Ποιοτικές Μέθοδοι της Σεισμικής Τρωτότητας των Κατασκευών. Μελέτη Περίπτωσης για μία Κρίσιμη Υποδομή. Αθήνα. Ανάκτηση από <https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/handle/11400/3884>
- Σταματάκης, Α. Ζ. (2012). Σεισμική Τρωτότητα Δικτύων Ύδρευσης και Αποχέτευσης. Αθήνα.
- Τερζή, Β., Αλεξούδη, Μ., & Χατζηγώγος, Θ. (2008). Καμπύλες τρωτότητας εύκαμπτων αγωγών λόγω μόνιμων παραμορφώσεων. Παραμετρικές αναλύσεις.
- Τσουμάνη, Π. (2023). Τρωτότητα μεταλλικών κατασκευών λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής. Θεσσαλονίκη.
- Φωτοπούλου, Σ. (2007). Αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας του δικτύου αποχέτευσης της πόλης των Γρεβενών. Θεσσαλονίκη.